



TEKNILLINEN KORKEAKOULU

**Sähkö- ja tietoliikennetekniikan osasto
Sähköverkot ja suurjännitetekniikka**

Anne-Mari Lehto

**KAHDENKYMMENTEN kV:n SALAMASYÖKSYJÄNNITEGENERAATTORIN
KEHITTÄMINEN**

Diplomityö, joka on jätetty opinnäytteenä tarkastettavaksi diplomi-insinöörin tutkintoa varten Espoossa 09.04.2008.

Työn valvoja

Professori Matti Lehtonen

Työn ohjaaja

TkL Petri Hyvönen

TEKNILLINEN KORKEAKOULU

Diplomityön tiivistelmä

Tekijä:	Anne-Mari Lehto		
Työn nimi:	Kahdenkymmenen kV:n salamasyöksyjännitegeneraattorin kehittämisen		
Päivämäärä:	09.04.2008	Sivumäärä:	ix + 74
Osasto:	Sähkö- ja tietoliikennetekniikan osasto		
Professuuri:	S-18 Sähköverkot ja suurjännitetekniikka		
Työn valvoja:	Professori Matti Lehtonen		
Työn ohjaaja:	TkL Petri Hyvönen		
<p>Suurjänniteteisteillä tutkitaan ja todennetaan laitteiden jännitelujuusominaisuuksia. Käytettävät koejännitteet ovat aina laitteen suurinta käyttöjännitettä suurempia ja tarvittavat testit on määritelty eri standardeissa. Sopivan jännitelujuuden valintaan vaikuttaa mm. laitteen turvallisuus sekä kustannustekijät. Valinnan avuksi on kehitetty eristyskoordinaatio.</p> <p>Salamasyöksyjännite on impulssimainen salamaa simuloiva jännite, jota käytetään yhtenä koejännitteistä suurjänniteteisteissä. Salamasyöksyjännite saadaan aikaiseksi syöksyjännitegeneraattorilla, jonka peruspiiri muodostuu tasajännitelähteestä, vastuksista sekä kondensaattoreista. TKK:n (Teknillinen Korkeakoulu) suurjännitelaboratoriossa olevilla syöksyjännitegeneraattoreilla pystytään tuottamaan yli 20 kV:n sekä alle 4 kV:n syöksyjännitteitä. Väliin jäävällä jännitealueella testaus on kuitenkin näillä laitteilla hankalaa, minkä vuoksi haluttiin rakentaa kyseisellä jännitealueella toimiva salamasyöksyjännitegeneraattori.</p> <p>Tämä diplomityö käsittelee TKK:lle rakennetun 20 kV:n salamasyöksyjännitegeneraattorin suunnittelua ja rakentamista.</p>			
Avainsanat: syöksyjännitegeneraattori, testaustekniikka, salamasyöksyjännite, eristyskoordinaatio			

HELSINKI UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

Abstract of the Master's Thesis

Author:	Anne-Mari Lehto		
Name of the Thesis:	Devising a 20 kV lightning impulse generator		
Date:	09.04.2008	Number of Pages: ix + 74	
Department:	Department of Electrical and Communications Engineering		
Professorship:	S-18 Power Systems and High Voltage Engineering		
Supervisor:	Professor Matti Lehtonen		
Instructor:	Petri Hyvönen, Lis. Sc. (Tech.)		
<p>High voltage testing is used to explore and confirm electric strength of devices. The test voltages are always higher than the operating voltages. The tests needed are specified in different standards. Selecting of the proper electric strength is influenced both by the safety issues and cost factors. Of help to this selecting there has been developed an insulation co-ordination.</p> <p>Lightning impulse voltage (LI) is used as one of the test voltages in high voltage testing. LI is generated by a lightning impulse generator, which basicly consists of a high voltage DC source, resistors and capacitors. With LI generators at High Voltage Laboratory of HUT (Helsinki University of Technology) it's possible to produce lightning impulse voltages under 4 kV or over 20 kV. However, testing within the voltage range between those is difficult with these equipments. Therefore it became necessary to build up a generator to produce voltages from 1 kV to 20 kV.</p> <p>This Thesis covers the devising of this 20 kV lightning impulse generator built at HUT.</p>			
Keywords: impulse voltage generator, lightning impulse (LI), high voltage testing, insulation co-ordination			

ALKULAUSE

Tämä diplomityö on tehty Teknillisen Korkeakoulun Sähköverkot ja suurjännitetekniikan laboratoriossa opinnäytteeksi Sähkö- ja tietoliikennetekniikan osastolle.

Haluan kiittää työn valvojaa professori Matti Lehtosta sekä työn ohjaajaa TkL Petri Hyvöstä. Korvaamatonta apua olen saanut erityisesti DI Yuri Chekurovilta syöksyjännitegeneraattorin rakennusvaiheessa. Kiitokset myös DI Kari Nurmiselle puhelinsoitoista Saksaan. TkT Jari Hällström, TkL Esa-Pekka Suomalainen, Ins. Veli-Matti Niiranen ja Jouni Mäkinen ovat myös tarpeen tullen auttaneet diplomityössäni. Suuret kiitokset myös koko muulle Sähköverkot ja suurjännitetekniikan laboratorion henkilökunnalle mukavasta työilmapiiristä.

Haluan lisäksi kiittää perhettäni. Erityisesti äidille suuret kiitokset koko pitkän opintieni ajan kestäneestä tuesta.

Espoossa 7. huhtikuuta 2008

Anne-Mari Lehto

SISÄLLYSLUETTELO

1	Johdanto.....	1
2	Suurjännitetestaus.....	2
2.1	Eristyskoordinaatio.....	3
2.1.1	Konventionaalinen menetelmä.....	6
2.1.2	Tilastollinen menetelmä.....	7
2.2	Ilmastolliset ylijännitteet.....	9
2.2.1	Salaman syntymekanismi.....	10
2.3	Testityypit.....	11
2.4	Testien vaatimukset.....	12
2.4.1	Testauksen laatu.....	12
2.5	Koejännitteet.....	13
2.5.1	Salamasyöksyjännite.....	13
2.5.2	KytKentäsyöksyjännite.....	15
2.5.3	Käyttötaajuinen vaihtojännite.....	17
2.5.4	Tasajännite.....	17
2.6	Syöksyjännitetestit.....	17
2.7	Suurjännitemittaukset.....	20
3	Syöksyjännitegeneraattori.....	22
3.1	Yleistä.....	22
3.2	Syöksyjännitegeneraattorin rakenne ja toiminta.....	22
3.2.1	Yksiportainen rakenne.....	22
3.2.2	Moniportainen rakenne.....	24
4	Komponentit.....	26
4.1	KytKin.....	26
4.1.1	KytKimen kääntäminen.....	26
4.2	Suurjännitekondensaattorit.....	28
4.2.1	Kondensaattorien lämpötilariippuvuudet.....	29
4.3	Tasajännitelähde.....	30
4.4	Vaimennusvastus R_D ja purkausvastus R_E	31
4.5	Jännitteenjakaja.....	34
4.6	Latausvastus.....	37
4.7	Ohjauselektroniikka.....	38

5	Simuloinnit lasketuilla komponenttiarvoilla	41
6	Mekaaninen suunnittelu	45
7	Generaattorin testaus	51
8	Yhteenveto.....	54
9	Lähdeluettelo	56

Liitteet

LIITE 1: Standardoidut eristystasot (IEC 60071-1)

LIITE 2: Glassman tasajännitelähde EL30R01.5

LIITE 3: Pulssivastus NIO3.6:n tekniset tiedot

LIITE 4: Metallioksidivastus Rox-4:n tekniset tiedot

LIITE 5: Metallikalvovastus MFR1/2W:n tekniset tiedot

LIITE 6: Jännitteenjakajan skaalausertoimen mittaukset

LIITE 7: Paksukalvovastus F44D:n tekniset tiedot

LIITE 8: Digitaalisen paneelimittari N15:n tekniset tiedot

LIITE 9: Ohjauspiiri

KÄYTETYT LYHENTEET

IEC	International Electrotechnical Commission
LI	Lightning impulse, salamasyöksyjännite
SI	Switching impulse, kytkentäsyöksyjännite
TCC	Temperature coefficient of capacitance, kapasitanssin lämpötilakerroin
TCR	Temperature coefficient of resistance, resistanssin lämpötilakerroin
TKK	Teknillinen Korkeakoulu
u&d -menetelmä	Up and down -menetelmä, syöksyjännitetesti

KÄYTETYT MUUTTUJAT

$0'$	Virtuaalinen origo
C_1	Syöksykondensaattori
C_2	Kuormituskondensaattori
C_L	Kuorma
$F(\hat{u})$	Ylilyöntitodennäköisyyskäyrä
k	Varmuuskerroin
K	Ylilyöntiriski
k_{cs}	Varmuuskerroin tilastollisessa menetelmässä
N	Syöksyjännitepulssien lukumäärä jännitelujuuden määrittämistestissä
N_j	Syöksyjännitepulssien lukumäärä jännitteellä U_j
$p(\hat{u})$	Ylijänniteamplitudien tiheysfunktio
R_1	Vaimennusvastus
R_2	Purkausvastus
R_c	Latausvastus
S_f	Scale factor, skaalauskerroin
T	Nousuaika
T_0	Aika jännitteen nollakohtaan
T_1	Rinnankestoaika
T_2	Selän puoliarvonaika
T_{30}	Aika, jolloin pulssi on noussut 30 % huippuarvosta
T_{50}	Aika, jolloin jännite on laskenut puoleen huippuarvostaan
T_{90}	Aika, jolloin pulssi on noussut 90 % huippuarvosta
T_d	Aika, jonka jännite on vähintään 90 % huippuarvosta
U_0	Syöksykondensaattorin latausjännite
U_{50}	Jännite, jolla 50 % ylilyöntitodennäköisyys
U_j	Jännitetaso

\hat{u}_{ov}	Edustava ylijännite
\hat{u}_{ov2}	Tilastollinen ylijännite
U_p	Impulssijännitteen arvo, huippuarvo
U_{wv}	Eristyksen kestotaso

1 Johdanto

Tämän diplomityön tarkoituksena on ollut valmistaa Teknillisen Korkeakoulun (TKK) suurjännitelaboratoriolle salamasyöksyjännitteitä tuottava syöksyjännitegeneraattori. Generaattoria tullaan käyttämään pienjännitelaitteiden jännitelujuuden testaamiseen.

Laboratoriossa jo olevilla syöksyjännitegeneraattoreilla pystytään tuottamaan alle 4 kV:n sekä yli 20 kV:n syöksyjännitteitä. Väliin jäävän alueen testaus on kuitenkin ollut hankalaa olemassa olevilla laitteilla. Tämän vuoksi on ilmennyt tarvetta syöksyjännitegeneraattorille, jolla pystyttäisiin tuottamaan suoraan 1-20 kV:n syöksyjännitteitä ja jossa aaltomuoto olisi muokattavissa ulkoisten komponenttien avulla.

Työn alussa luvussa 2 on käsitelty suurjännitetestausta ja esitelty siihen liittyviä vaatimuksia ja standardeja. Luvussa 3 on esitetty syöksyjännitegeneraattorin perusrakenne ja toimintaperiaate. Neljännessä luvussa on esitelty TKK:lle rakennetun syöksyjännitegeneraattoriin valitut komponentit ja niiden valintakriteerit. Valittujen komponenttiarvojen perusteella simuloidut aaltomuodot ovat luvussa 5. Työn loppuosassa luvuissa 6-8 on esitelty generaattorin rakenne ja kytkentäkaaviot, testaustulokset sekä yhteenveto työstä.

2 Suurjännitetestaus

Sähkölaitteiden luotettava ja turvallinen toiminta riippuu niiden eristystasosta. Suurjänniteteillä tutkitaan ja todennetaan eristyksen jännitelujuutta. Testeissä käytettävät koejännitteet ovat laitteen suurinta käyttöjännitettä suurempia ja laite altistetaan näille ylijännitteille määrättyjä ajanjaksoja. Eristys joko kestää tai siinä tapahtuu yli- tai läpilyönti. Asiakkaan näkökulmasta läpimennyt testi kertoo laitteen täyttävän tietyn eristystason vaatimukset (T. J. Gallagher, 1983).

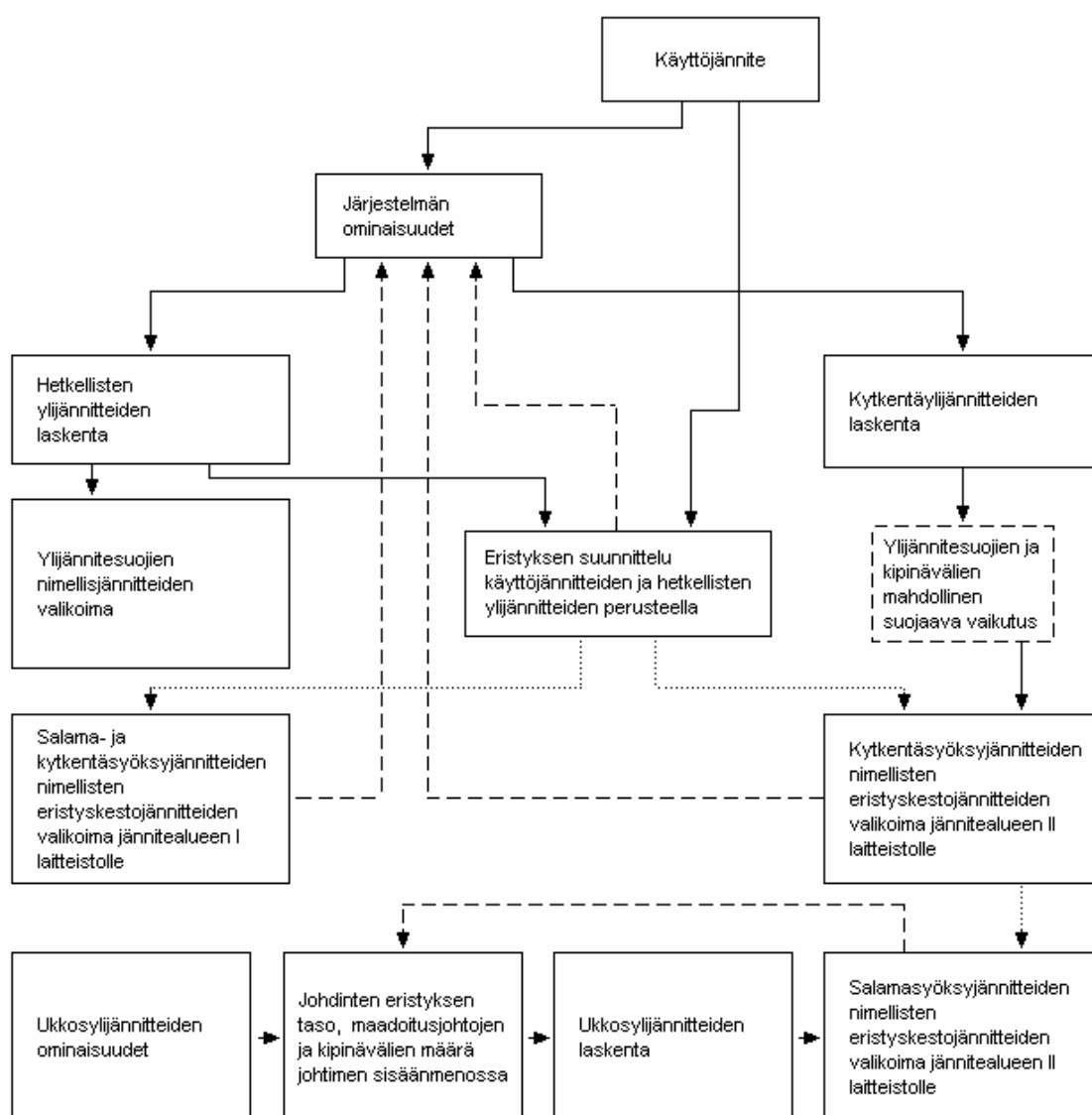
Testit tehdään standardien mukaisesti, myös testausolosuhteet on standardisoitu. Jotta testitulokset olisivat mahdollisimman luotettavia myös todellisissa käyttöolosuhteissa, tehdään laitteille esimerkiksi testejä, joissa laite altistetaan sadetta simuloivalle vesisuihkulle. Testit tulee aina dokumentoida tarkasti.

Eristysrakenteet voidaan jakaa kolmeen ryhmään sen mukaan, miten jännitetestaus niihin vaikuttaa. Palautuvaan eristysrakenteeseen ei synny vaurioita yli- tai läpilyönnistä. Esimerkiksi kaasut ovat palautuvia eristeitä. Palautumaton eristysrakenne puolestaan vaurioituu. Kiinteät eristeet ovat palautumattomia. Kolmannen ryhmän eristysrakenteen jännitelujuus voi pienentyä jo yli- tai läpilyöntijännitettä alemmilla jänniterasituksilla.

Suure jännitelujuus on luonteeltaan satunnainen ja sen vaihteluun vaikuttavat monet seikat. Tämän vuoksi sen yhteydessä tulee aina antaa myös todennäköisyys yli- tai läpilyönnille. Jännitelujuuden määrittävien testien tuloksia käsitellään tilastollisin menetelmin. Yleisimmin niihin sovelletaan Gaussin jakaumaa eli normaalijakaumaa tai Weibullin jakaumaa. Esimerkiksi normaalijakaumaa käytettäessä testitulokset sijoitetaan koordinaatistoon, jonka pystyakseli on normaalijakauman mukainen. Tällöin tuloksiin voidaan sovittaa suora, jonka avulla voidaan päätellä jakauman ominaisuuksia ja estimaatteja. Saaduille estimaateille on myös määritettävä luottamusvälit. Luottamusväli on väli, jolla oikea arvo tietyllä todennäköisyydellä (yleensä 95 %) on. Luottamusvälit tulee aina ilmoittaa testaustuloksien yhteydessä.

2.1 Eristyskoordinaatio

Jännitelujuuden mitoittaminen liian suureksi ei ole taloudellisesti järkevää. Eristystasoa valittaessa onkin otettava huomioon sen vaikutus sekä laitteen valmistuksen hintaan että käyttöhäiriöiden määrään ja niistä aiheutuviin kustannuksiin. Sähkönlaatuvaatimukset asettavat eristystason valinnalle omat reunaehdot. Eristystason oikea valinta onkin eräänlainen optimointitehtävä, jossa tulee huomioida useita eri näkökohtia. Kuvassa 1 on havainnollistettu eristystason valintaan vaikuttavia tekijöitä.




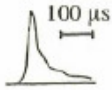
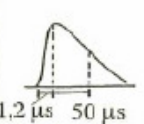
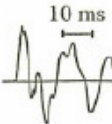
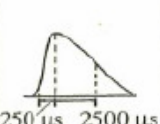


Kuva 1 Eristystason valinnassa huomioon otettavia tekijöitä (Ryan, 2001)

Ylijännitteet ovat luonteeltaan satunnaisia. Niiden määrää ja suuruutta voidaan siis ai-noastaan arvioida etukäteen. Laitteita ei voida suojata kaikilta mahdollisilta jänniterasi-tuksilta. Tärkeimmät ja kalleimmat kohteet, kuten suurmuuntajat ja GIS-laitokset (gas-insulated switchgear, kaasueristetty kytkinlaitos), suojataan kuitenkin aina tehokkaim-min.

Sähkölujuus vaihtelee eri jänniterasituksilla. Tämän vuoksi eristystasoja testataan erilai-silla koejännitteillä, jotka edustavat eri jänniterasitusmuotoja. Jänniterasitukset on jao-teltu viiteen eri ryhmään, jotka ovat

- Jatkuva käyttöjännite
- Käyttötaajuiset ylijännitteet
- Hitaat transienttijännitteet
- Nopeat transienttijännitteet
- Erittäin nopeat transienttijännitteet

Kuvassa 2 on esimerkit eri jänniterasituksista sekä niitä edustavat standardoidut koejän-nitemuodot. Koejännitteet on esitelty tarkemmin luvussa 2.5.

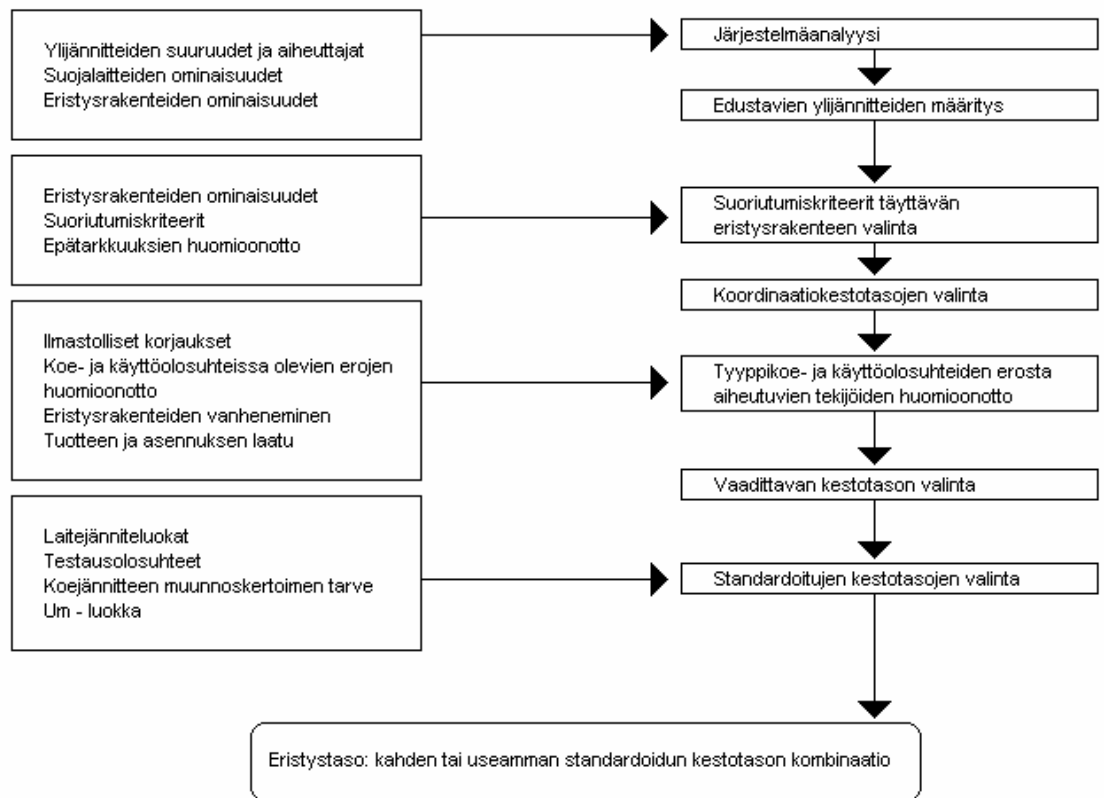
Nimi		Ylijännitteen muoto	Koejännitteen muoto
transientti- ylijännite	erittäin jyrkkä		sovitaan laitekohtaisesti
	jyrkkä		
	loiva		
pientaajuinen ylijännite			

Kuva 2 Jänniterasitustyytit sekä niitä vastaavat koejännitteet (Martti Aro, 2003)

Oikeansuuruisen eristystason valitsemisen avuksi on kehitetty eristyskoordinaatio. Se käsittää valikoiman eristystasoista ottaen huomioon ylijänniterasitukset ja suojalaitteet. Tarkoituksena on saada laitteen rikkoutumisen todennäköisyys mahdollisimman pieneksi järkevillä kustannuksilla (Miloje Minović, 1992). Eristyskoordinaatiossa on tietty määrä eristystasoja, joista valita. Sopiva eristystaso eli eristysrakenteen kestotaso on jännitearvo, jolla eristysrakenteen yli- tai läpilyöntitodennäköisyys on pieni. Tyypillisesti todennäköisyys on noin 10 %. Valitut tasot vaihtelevat maittain ja yhtiöittäin, mutta koko verkko tulisi kuitenkin aina toteuttaa saman valintaperiaatteen mukaisesti. Eristystasojen valintojen erot johtuvat esimerkiksi erilaisista olosuhteista ja käyttöjännitteistä.

Eristyskoordinaatioprosessin kulku on yksinkertaistettusti seuraavanlainen: Aluksi otetaan selvää jänniterasituksista ja jaetaan ne eri jänniterasitustyypeihin. Jänniterasitusten perusteella valitaan sopivat eristystasot. Seuraavaksi tarkistetaan testein järjestelmän kaikkien laitteiden jännitelujuusominaisuudet. Kuvassa 3 on standardissa esitetty kaaviokuva eristyskoordinaatioprosessin etenemisestä (IEC 60071-1, 1993).

Eristyskoordinaation toteuttamiseksi on olemassa kaksi erilaista tapaa, konventionaalinen sekä tilastollinen menetelmä.



Kuva 3 Eristyskoordinaatioprosessin vaiheet (IEC 60071-1, 1993)

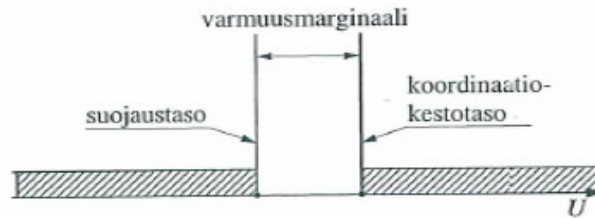
2.1.1 Konventionaalinen menetelmä

Konventionaalisessa menetelmässä jätetään halutun suuruinen varmuusmarginaali edustavan ylijännitteen ja valitun kestotason väliin. Kuvassa 4 on esitetty eristyskoordinaation toteutusta käyttäen varmuusmarginaalia. Varmuusmarginaalin ohella käytetään myös termiä varmuuskerroin k , joka on määritelty

$$k = \frac{U_{wv}}{\hat{u}_{ov}} \quad (1)$$

missä U_{wv} on eristyksen kestotaso ja \hat{u}_{ov} on edustava ylijännite. Edustava ylijännite on tietyn jänniterasitustyyppin ylijännitetaso, jota ei ylitetä usein. Tyypillisesti ylityksen to-

dennäköisyys on noin 2 %. Varmuuskertoimille löytyy standardoituja suositusarvoja eri jänniterasitustyypeille.



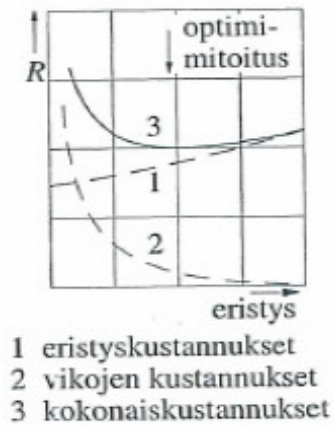
Kuva 4 Eristyskoordinaation toteutus konventionaalisella menetelmällä (Martti Aro, 2003)

2.1.2 Tilastollinen menetelmä

Tilastollisessa eristyskoordinaatiomenetelmässä pyritään löytämään eristystaso, jolla investointi- ja käyttöhäiriökustannuksista muodostuvat kokonaiskustannukset ovat minimissään. Kuvassa 5 on esitetty mitoitusta tilastollisen menetelmän avulla. Käyttöhäiriökustannuksia arvioidaan ns. ylilyöntiriskin K avulla. Kokonaisylilyöntiriski saadaan integroimalla

$$K = \int_{\hat{u}_{\min}}^{\hat{u}_{\max}} p(\hat{u})F(\hat{u})d\hat{u} \quad (2)$$

missä $p(\hat{u})$ on ylijänniteamplitudien tiheysfunktio ja $F(\hat{u})$ on eristysrakenteen ylilyöntitodennäköisyyskäyrä.



Kuva 5 Eristystason valinta tilastollisessa menetelmässä (Martti Aro, 2003)

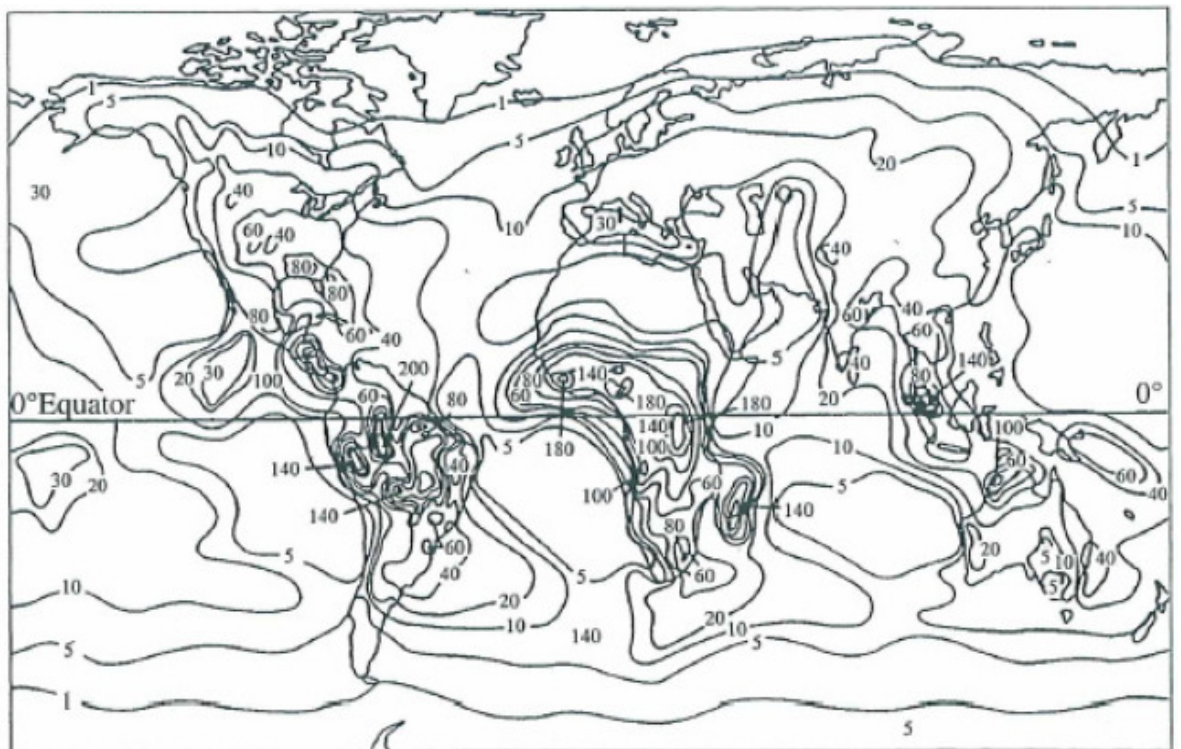
Myös tilastollisessa menetelmässä voidaan käyttää varmuuskerrointa. Tilastolliselle menetelmälle varmuuskerroin k_{cs} määritellään

$$k_{cs} = \frac{\hat{u}_{cwy}}{\hat{u}_{ov2}} \quad (3)$$

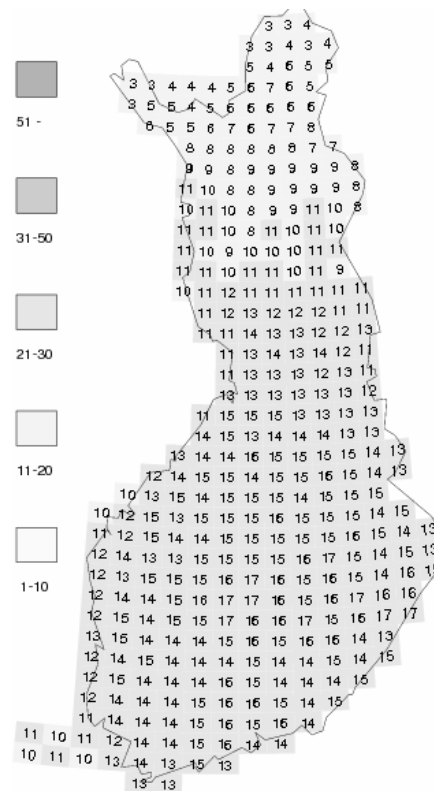
missä \hat{u}_{cwy} on koordinaatiokestotaso ja \hat{u}_{ov2} on tilastollinen ylijännite.

2.2 Ilmastolliset ylijännitteet

Osa ylijännitteistä syntyy ukonilmalla salamaniskujen seurauksena. Suomessa ukkospäivien määrä vaihtelee Pohjois-Suomen noin viidestä ja Etelä-Suomen noin viiteentoista vuodessa (T. J. Gallagher, 1983). Kuvassa 6 on maapallon isokerauniset tasot eli ukkospäivien määrä vuodessa. Kuvassa 7 puolestaan on esitetty keskiarvomäärät Suomen ukkospäivistä vuodessa vuosien 1998 – 2006 ajalta.



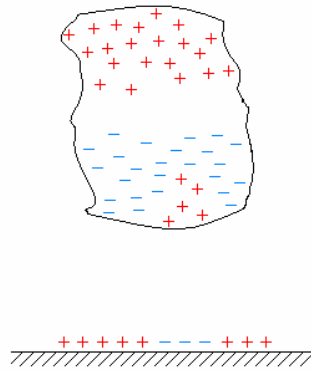
Kuva 6 Maapallon isokerauniset tasot (T. J. Gallagher, 1983)



Kuva 7 Ukkospäivät Suomessa vuosina 1998-2006 (Ilmatieteen laitos)

2.2.1 Salaman syntymekanismi

Ukonilman aikana ukkospilven ylä- ja alaosa varautuvat erimerkkisiksi. Yleensä pilven yläosa varautuu positiivisesti ja alaosa negatiivisesti. Pilven negatiivisesti varautuneeseen alaosaan muodostuu usein myös pieni positiivisesti varautunut alue. Maan pinnalle indusoituu myös ukkospilven varauksen vaikutuksesta vastakkaismerkkinen varaus. Kuvas-
sassa 8 on havainnollistettu ukkospilven rakennetta. Ukkospilven tarkkaa syntymekanismia ei tiedetä, mutta edellytyksenä ovat ainakin voimakkaat pystyvirtaukset, jotka erottelevat varaukset.



Kuva 8 Ukkospilvi. Varaukset ovat jakautuneet sekä pilven sisällä että maan pinnalla.

Salamanisku syntyy kun kentänvoimakkuus on suurempi kuin ilman jännitelujuus. Ukkospilven korkeudessa jännitelujuus on tyypillisesti 500 - 1000 kV/m kun taas merenpinnan tasolla jännitelujuus on huomattavasti suurempi, noin 3000 kV/m. Ukkospilvestä toiseen iskevät purkaukset ovat siten huomattavasti maahan kohdistuneita yleisempiä, mutta ne ovat yleensä vaarattomia sähkölaitteille.

Salama voi aiheuttaa ylijännitteitä kolmella eri tavalla. Näistä vaarallisin on suora isku jännitteeseen osaan. Tällöin syntyvä ylijännite riippuu purkausvirrasta ja laitteiston impedanssista. Impedanssi on tyypillisesti 500 – 700 Ω . Suoria iskuja yritetään estää esimerkiksi avojohdon ukkosköysillä. Salama voi iskeä myös jännitteettömään osaan kuten avojohdon pylvääseen. Jos jännitteettömään osaan syntyvä ylijännite on riittävän suuri, syntyy ylilyönti jännitteeseen osaan. Tätä kutsutaan takaiskuksi. Jännitteeseen osaan voi myös indusoida ylijännite lähelle iskevän salaman vaikutuksesta. Indusoidut ylijännitteet ovat yleensä kuitenkin hyvin pieniä.

2.3 Testityypit

Erilaisia testauksia tehdään laitteen valmistuksen eri vaiheissa (Marti Aro, 2003). Suunnitteluvaiheessa tehdään suunnittelutestauksia sekä tyyppitestaus. Tyyppitestauksen tavoitteena on varmistua, että laitetyyppi ja sen suunnittelu on oikeanlainen. Tyyppitestaus sisältää useita mittauksia. Tyyppitestaus tehdään ennen sarjatuotannon aloittamista. Valmiit tuotteet testataan jokainen kappaletestauksessa, joka on yleensä melko

suppea. Satunnaisesti valitut kappaleet valmiista laite-erästä testataan kuitenkin tarkemmin näytetestauksilla. Asiakkaalla on oikeus tutustua tyyppi- ja näytetestauksista laadittuihin testausselesteisiin.

2.4 Testien vaatimukset

Suurjännitetestejä tehdään sekä laitteiden valmistajien tiloissa että erityisissä suurjännitelaboratorioissa. Toisinaan testejä suoritetaan myös käyttöpaikalla.

Testien täytettävät perusvaatimukset ovat (Martti Aro, 2003),

- Edustavuus
- Toistettavuus ja uusittavuus
- Riippumattomuus
- Selektiivisyys

Edustavuudella tarkoitetaan sitä, että testit vastaavat niitä käytännön rasituksia, joita laitteeseen kohdistuu käytössä. Testin toistettavuus kertoo testitulosten olevan samoja ajasta ja paikasta riippumatta. Uusittavuus puolestaan tarkoittaa samanlaisen testin tekemistä samoissa olosuhteissa, samassa laboratoriossa samalle tai samanlaiselle koekappaleelle. Toistettavuuden ja uusittavuuden takia on tärkeää, että testimenetelmät ovat yhteneviä. Testien tulosten tulisi olla riippumattomia koekappaleelle aikaisemmin tehdyistä testeistä. Testien välillä tulisi siis olla riittävästi palautumisaikaa. Toisinaan aikaisemman testin rasitus saattaa vaikuttaa myöhemmän testin tuloksiin. Selektiivisen testin tuloksista nähdään luotettavasti onko koekappaleen laatu hyväksyttävä.

2.4.1 Testauksen laatu

Suurjännitetestit ovat pitkälti määriteltyjä standardien muodossa. Testauksien laatuun vaikuttaa kuitenkin standardien noudattamisen lisäksi mm. tilat ja laitteistot, testaushenkilöiden pätevyys, mittauksien jäljitettävyys sekä riittävä dokumentointi. Aikaisemmin suurjännitelaboratorioiden testausten laadusta huolehtivat ainoastaan laboratoriot itse. Nykyään laadun takeeksi tarvitaan usein kuitenkin puolueeton osoitus pätevyydestä. Akkreditoitujen laboratorioiden testausten laatua valvovat oman henkilökunnan lisäksi ulkopuoliset arvioijat. Akkreditointijärjestelmän myötä asiakas voi luottaa laboratorion testaustulosten oikeellisuuteen.

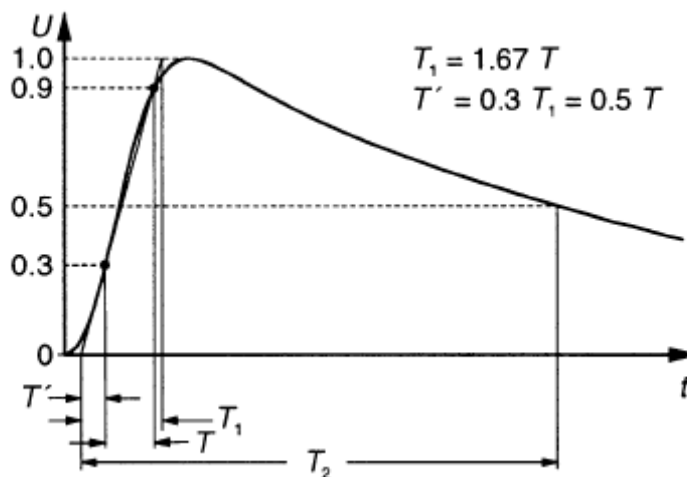
2.5 Koejännitteet

Suurjännitetesteissä käytettävät koejännitteet on määritelty IEC:n standardissa IEC 60060-01. Käytettävät koejännitteet ovat salamasyöksyjännite, kytkentäsyöksyjännite, käyttötaajuinen vaihtojännite sekä tasajännite.

Koejännitteille on IEC:n standardissa annettu myös sallitut vaihteluvälit eli toleranssit. Lisäksi koejännitteiden mittausvirheet ja mittausepävarmuus tulee ottaa huomioon. IEC:n standardia käytettäessä mittaustuloksen epävarmuuden rajojen ei tarvitse sisältyä toleranssirajojen sisäpuolelle.

2.5.1 Salamasyöksyjännite

Salamasyöksyjännite on impulssimainen, salamaa muistuttava jännite. Kuvassa 9 on esitetty IEC:n standardin mukainen salamasyöksyjännite. Standardissa on määritetty salamasyöksyjännitteelle rinnankesto aika $T_1 = 1,2 \mu s$ ja selän puoliarvonaika $T_2 = 50 \mu s$. Salamasyöksyjännitteitä kutsutaan myös 1,2/50 impulssiksi. Impulssimaisia koejännitteitä käytetään mm. kaapeleiden, muuntajien, johdinten ja eristeiden testaamiseen.



Kuva 9 Standardimuotoinen salamasyöksyjännite (IEC 60060-01, 1989)

Impulssijännitteen arvo U_p

Impulssijännitteen arvoksi U_p on määritelty sen huippuarvo. Testijännitteen tulee standardin mukaisesti pysyä rajoissa $U_N \pm 3 \%$, missä U_N on haluttu testijännitteen suuruus.

Joskus jännitteen huipun kohdalla esiintyy värähtelyä. Tällöin käytetään normaalisti keskiarvokäyrää värähtelyn ajalta. Impulssijännitteen arvoksi U_p valitaan tällöin keskiarvokäyrän huippuarvo. Näin toimittaessa tulee värähtelyn taajuuden olla vähintään 0,5 MHz tai ylitys kestoaltaan korkeintaan 1 μ s.

Rinnankesto aika T_I

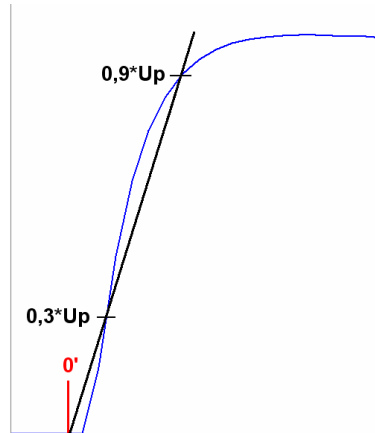
Pulssin nousuajaksi T on määritelty aika, joka pulssilta kestää nousta 30 prosentista 90 prosenttiin impulssijännitteen arvosta U_p . Rinnankesto aika T_I on 1,67 kertaa nousu aika.

$$T_I = 1,67 * T = 1,67 * (T_{90} - T_{30}) \quad (4)$$

missä T_{30} ja T_{90} ovat ajat, jolloin pulssi on noussut 30 % ja 90 % huippuarvosta. Standardin mukaan rinnankesto ajan T_I tulee olla $1,2 \mu\text{s} \pm 30 \%$ eli välillä $0,84 - 1,56 \mu\text{s}$. Laitekohtaisissa standardeissa sallitaan myös tästä poikkeavia aikoja. Esimerkiksi kaapeleille $T_I = 1 - 5 \mu\text{s}$.

Virtuaalinen origo $0'$

Jännitteen 30 % ja 90 % kautta kulkevan suoran leikkauspistettä aika-akselin kanssa kutsutaan virtuaaliseksi origoksi. Kuvassa 10 on esitetty virtuaalisen origon paikan määrittäminen.



Kuva 10 Virtuaalisen origon määräytyminen

Selän puoliarvonaika T_2

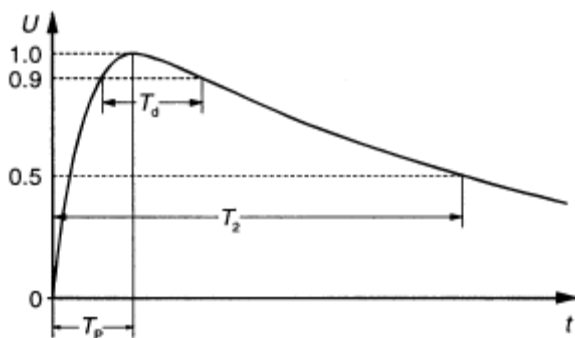
Selän puoliarvonaika määritellään virtuaalisesta origosta siihen hetkeen, kun pulssi on laskenut puoleen huippuarvosta U_p .

$$T_2 = T_{50} - T_{0'} \quad (5)$$

missä T_{50} on aika, jolloin jännite on laskenut puoleen huippuarvostaan ja $T_{0'}$ on aika virtuaalisen origon kohdalla. IEC:n standardin mukaisesti salamasyöksyjännitteen selän puoliarvon ajan T_2 tulee olla $50 \mu s \pm 20 \%$ eli 40 - 60 μs .

2.5.2 KytKentäsyöksyjännite

KytKentäsyöksyjännite on impulssimainen jännite. Se on huomattavasti salamasyöksyjännitettä hitaampi. Kuvassa 11 on esitetty IEC:n standardin 60060 mukainen kytKentäsyöksyjännite. Standardissa on kytKentäsyöksyjännitteelle määritelty aika huippuarvoon $T_p = 250 \mu s$ ja selän puoliarvonaika $T_2 = 2500 \mu s$. KytKentäsyöksyjännitettä kutsutaan myös 250/2500 impulssiksi.



Kuva 11 Standardimuotoinen kytkentäsyöksyjännite (IEC 60060-01, 1989)

Aika huippuarvoon T_p

Aika huippuarvoon on ajanjakso origosta siihen hetkeen, jolloin jännite on noussut huippuarvoon U_p . Standardinmukaisen kytkentäsyöksyjännitteelle aika huippuarvoon T_p on $250 \mu\text{s} \pm 20 \%$ eli välillä 200 - 300 μs .

Selän puoliarvonaika T_2

Selän puoliarvonaika määritellään origosta siihen hetkeen, kun pulssi on laskenut puoleen huippuarvosta U_p . Kytkentäsyöksyjännitteen standardinmukainen selän puoliarvonaika T_2 on $2500 \mu\text{s} \pm 60 \%$ eli 1000 - 4000 μs .

Aika 90 % yläpuolella T_d

Kytkentäsyöksyjännitteelle on määritetty myös aika 90 % yläpuolella T_d . Tämä määritellään aikana, jonka jännite on vähintään 90 % huippuarvosta U_p .

Aika jännitteen nollakohtaan T_0

Aika jännitteen nollakohtaan T_0 on aika origosta siihen hetkeen, kun jännite ensimmäistä kertaa laskee takaisin nollaan.

Aikaa 90 % yläpuolella T_d ja aikaa jännitteen nollakohtaan T_0 käytetään lähinnä silloin, jos impulssin muotoon vaikuttaa saturaatioilmiö tai jos näiden parametrien katsotaan olevan olennaisia testin kannalta.

2.5.3 Käyttötaajuinen vaihtojännite

Käyttötaajuinen koejännite on yleensä 2-3 -kertainen laitteen suurimpaan käyttöjännitteeseen nähden. Koejännitettä ei mitata tehollisarvona vaan huippuarvon suhteena $\sqrt{2}$:een.

Vaihtojännitteen aaltomuodon tulee olla suunnilleen sinimuotoinen ja aallonpuolikkaiden tulee olla lähes samanlaiset. Pienet vaihtelut aaltomuodossa eivät kuitenkaan vaikuta testituloksiin, kunhan jännitteen huippuarvon ja tehollisarvon suhde on $\sqrt{2} \pm 5 \%$. Koejännitteen tulee pysyä $\pm 1 \%$ sisällä määritellystä jännitetasosta koko testin ajan. Kuitenkin yli minuutin kestävässä testeissä sallitaan $\pm 3 \%$ toleranssit.

2.5.4 Tasajännite

Testeissä käytettävässä tasajännitteessä ei saa olla aaltoilua yli 3 prosenttia jännitteen arvosta. Alle minuutin kestävässä testeissä jännitearvon tulee pysyä $\pm 1 \%$ sisällä määritellystä jännitetasosta koko testin ajan. Jos testi kestää yli minuutin, sallitaan $\pm 3 \%$ toleranssit.

2.6 Syöksyjännitetestit

Syöksyjännitetestejä tehdään jännitelujuuden määrittämiseksi ja todentamiseksi. Testejä tehdään sekä salama- että kytkentäsyöksyjännitteillä.

15/2 tai 3/0 testit ovat eristeen kestotestauksia. 15/2 testissä eristeeseen syötetään 15 pulssia joiden johdosta saa tapahtua korkeintaan kaksi ylilyöntiä. Tällaista testiä voidaan käyttää palautuvien eristeiden kohdalla. Testiä voidaan käyttää kuitenkin myös eristerakenteessa jossa on sekä palautuvia että palautumattomia eristyksiä. Palautumattomassa eristeosassa ei sallita lainkaan läpilyöntiä ja palautuvassa osassa sallitaan kaksi ylilyöntiä. Palautumattomien eristeiden kestotestaus toteutetaan kolmella pulssilla 3/0 testillä. Tässä testissä ei yli- tai läpilyöntejä sallita lainkaan.

Jännitelujuuden määrittämiseksi käytetään joko Up and down –menetelmää (u&d-menetelmä) tai monitasomenetelmää. U&d –menetelmässä lähdetään liikkeelle jännitetasosta, josta tiedetään ettei ylilyöntejä vielä tapahdu. Jännitettä nostetaan portaittain kun-

nes tapahtuu ylilyönti. Ylilyönnin jälkeen palataan yksi jänniteporras alaspäin. Taas jos ylilyöntiä ei tapahdu, jännitettä nostetaan seuraavalle portaalle. Näin jatketaan kunnes ollaan saatu riittävä määrä tuloksia. Taulukossa 1 on esitetty u&d –menetelmällä tehdyn testin tulokset. Kestopulssit (pulssi, joka ei johda ylilyöntiin) on merkitty o:lla ja ylilyöntipulssit x:llä. Alussa olevista pulsseista otetaan huomioon ainoastaan ne, joiden jännitetasolla on vähintään kaksi pulssia. Saaduista tuloksista voidaan laskea 50 % ylilyöntijännite U_{50}

$$U_{50} = \frac{\sum_j N_j U_j}{N} \quad (6)$$

missä N_j on merkitsevien pulssien lukumäärä (o+x) jännitteellä U_j . N on kaikkien merkitsevien pulssien lukumäärä. Tuloksista saadaan laskemalla myös keskihajonnan estimaatti s käyttäen joko kestopulsseja (o) tai ylilyöntipulsseja (x)

$$s = 1,62 * \Delta U \left(\frac{s_u^2}{\Delta U^2} + 0,029 \right) \quad (7)$$

missä s_u on jännitearvojen varianssi ja ΔU on jänniteporras.

Taulukko 1 Up and down -menetelmä

U (kV)		(o)	(x)	(o+x)
520	o			
530	o			
540	o	3	0	3
550	o o x o x o x o x o o	6	2	8
560	o x o x o x o x o x o o	6	5	11
570	x o x o x o x o x o x	4	5	9
580	x x o x x	1	4	5
590	x	0	1	1
	Yhteensä	20	17	37

Monitasomenetelmä testaa jännitelujuutta usealla eri jännitetetasolla. Jokaisella tasolla käytetään tietty määrä pulsseja, usein $N_j = 20$. Taulukossa 2 esitetyissä tuloksissa pulsseja on käytetty 10 joka tasolla. Tuloksista saadaan ylilyöntien todennäköisyys jännite-tason funktiona

$$F(U_j) = \frac{n_j}{N_j} \quad (8)$$

missä n_j on ylilyöntien lukumäärä jännitteellä U_j .

Taulukko 2 Monitasomenetelmätestin tulokset

U (kV)		(o)	(x)	(o+x)	n_j/N_j
530	o o o o o o o o o o	10	0	10	0,00
540	o o o o o x o o o o	9	1	10	0,10
550	o x o x o x o o x o	6	4	10	0,40
560	o x o o x o x x o x	5	5	10	0,50
570	x o x o x x o x x x	3	7	10	0,70
590	x x x x x x x x o x	1	9	10	0,90

50 % ylilyöntijännitteen luottamusväli on

$$(U_{50} - 0,75s) \leq U_{50}^* \leq (U_{50} + 0,75s) \quad (9)$$

missä U_{50}^* on 50 % ylilyöntijännitteen oikea arvo, U_{50} on sen estimaatti ja s on keskihajonnan estimaatti. Keskihajonnan luottamusväli on

$$0,4s \leq \sigma \leq 2,0s \quad (10)$$

missä σ on keskihajonnan oikea arvo.

2.7 Suurjännitemittaukset

Suurjännitemittauksissa tuottaa ongelmia jännitteiden ja virtojen suuruus. Niitä ei voida mitata suoraan tavallisilla mittalaitteilla. Yleensä mittauksissa halutaan myös tieto jännitteen tai virran muodosta, jolloin tarvitaan lisäksi oskilloskooppi tai digitaalitallennin. Suurjännitemittauksilta vaaditaan muiden mittausten tavoin riittävä tarkkuus ja epävarmuusrajojen määrittely. Lisäksi virallisissa ja kaupallisissa mittauksissa vaaditaan mittausten jäljitettävyyden kansallisiin tai kansainvälisiin mittanormaaleihin.

Standardissa IEC 60060 on esitelty suurjännitemittauksiin liittyvät termit, laitteet sekä vaatimukset. Suurjännitemittauslaitteistoon kuuluvat osat ovat:

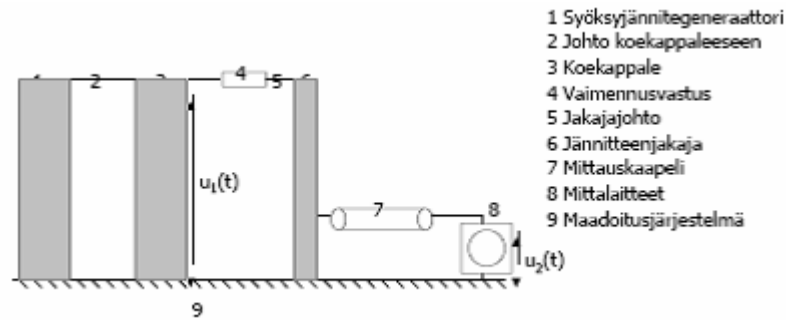
- Muunnin
- Siirtojärjestelmä
- Mittausinstrumentti
- Häiriösuojaus- ja maadoitusjärjestelmä

Kuvassa 12 on esitetty tyypillinen syöksyjännitteen mittausjärjestelmä.

Muuntimella mitattava suure kuten jännite muunnetaan mittalaitteelle sopivalle alueelle. Esimerkiksi jännitteenjakajalla saadaan mitattava jännite tarpeeksi pieneksi. Salamasyöksyjännitteiden mittauksissa jännitteenjakana käytetään joko vaimennettua kapasitiivista jakajaa tai resistiivistä jakajaa.

Siirtojärjestelmä on laitteiston se osa, joka on muuntimen ja mittausinstrumentin välillä. Se sisältää myös vaimentimet, sovitusimpedanssit tai –verkot ja päätteet.

Mittausinstrumentti voi olla joko osoittava tai tallentava mittari. Esimerkiksi huippujännitteen mittamiseen riittää tavallinen volttimittari, mutta jännitteen muodon selvittämiseksi tarvitaan oskilloskooppi tai digitaalitallennin.



Kuva 12 Syöksyjännitteen mittausjärjestelmä (Jarmo Partanen, 2004)

Häiriösuojauksella pyritään vähentämään mittauspiireihin siirtyviä häiriösignaaleja. Nämä häiriösignaalit voivat kytkeytyä galvaanisesti, induktiivisesti, kapasitiivisesti tai sähkömagneettisesti. Galvaanisessa kytkennässä suurivirtainen piiri aiheuttaa pienivirtaiseen piiriin yhteisessä impedanssissa suhteellisen suuren jännitehäviön ja häiriön. Tämän vuoksi kytkennöissä tulisi välttää eri piirien yhteisiä virtateitä. Induktiivinen kytkentä aiheutuu piirissä oleviin silmukoihin magneettikentän välityksellä. Kapasitiivisesti kytkeytyvillä häiriöillä tarkoitetaan sähkökentän muutoksista hajakapasitanssien välityksellä syntyviä häiriöitä. Niiden estämiseksi signaalipiirit tulisi sijoittaa mahdollisimman etäälle häiriölähteistä. Signaali johto voidaan myös suojata maadoitetulla metallivaipalla. Sähkömagneettisesti kytkeytyviä häiriöitä vastaan voidaan suojautua hyvin johtavilla metallikoteloinneilla.

Salamasyöksyjännitteen mittauksissa sallitaan standardin IEC 60060 mukaan huippujännitteelle U_p enintään $\pm 3 \%$ mittausepävarmuus. Aikaparametreille T_1 ja T_2 sallittu mittausepävarmuus on $\pm 10 \%$. Lisäksi jännitteenjakajan muuntokerroin ei saa vaihdella yli $\pm 1 \%$.

3 Syöksyjännitegeneraattori

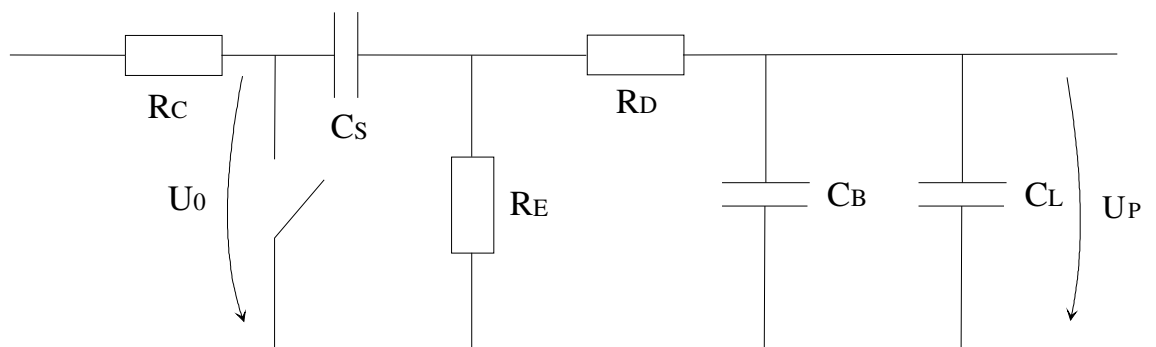
3.1 Yleistä

Syöksyjännite- eli impulssigeneraattorilla saadaan aikaiseksi impulssimaisia jännitteitä, joita tarvitaan sähkönsiirrossa käytettävien komponenttien tutkimiseen ja testaamiseen. Testeissä käytettävät salamasyöksyjännite (LI, lightning impulse) ja kytkentäsyöksyjännite (SI, switching impulse) on määritelty IEC:n standardissa IEC 60060-01.

3.2 Syöksyjännitegeneraattorin rakenne ja toiminta

3.2.1 Yksiportainen rakenne

Syöksyjännitegeneraattori muodostuu yksinkertaisimmillaan tasajännitelähteestä, kytkimestä, kahdesta kondensaattorista sekä kahdesta vastuksesta (kuva 13). Tällaisen yksiportaisen syöksyjännitegeneraattorin periaate on seuraavanlainen: Suurikokoinen syöksykondensaattori C_S varataan tasajännitelähteellä haluttuun testijännitteeseen. Tämän jälkeen kytkin suljetaan, jolloin kondensaattori purkautuu vastuksista R_E ja R_D sekä toisesta kondensaattorista C_B sekä kuormasta C_L muodostuvaan piiriin. Aaltomuoto säädetään halutuksi vastuksien R_E ja R_D ja kondensaattorin C_B avulla. Latausvastus R_C rajoittaa virran sopivan suuruiseksi sekä suojaa jännitelähdettä kytkimen ollessa kiinni. Samalla perusrakenteella voidaan tuottaa sekä salama- että kytkentäsyöksyjännitteitä. Komponenttien arvoissa on kuitenkin suuret erot.



Kuva 13 Yksiportainen syöksyjännitegeneraattori

Ulossaatava syöksyjännite voidaan esittää kahden eksponenttikäyrän summana

$$u_2(t) = \frac{U_0}{R_E (C_B + C_L)} \frac{\tau_1 \tau_2}{\tau_1 - \tau_2} (e^{-t/\tau_1} - e^{-t/\tau_2}) \quad (11)$$

missä U_0 on syöksykondensaattorin latausjännite, R_E on vaimennusvastuksen resistanssi, C_B kuormituskondensaattorin kapasitanssi, C_L kuorman kapasitanssi ja aikavakiot

$$\tau_1 \approx R_E \frac{C_S (C_B + C_L)}{C_S + C_B + C_L} \quad (12)$$

$$\tau_2 \approx R_D (C_S + C_B + C_L) \quad (13)$$

missä C_S on syöksykondensaattorin kapasitanssi ja R_D on purkausvastuksen resistanssi.

Yksiportaisen syöksyjännitegeneraattorin jännitehyötysuhde η on

$$\eta = \frac{U_p}{U_0} \approx \frac{C_S}{C_S + C_B + C_L} \quad (14)$$

missä U_p on saatavan impulssijännitteen arvo. Hyösuhteen vuoksi syöksykondensaattori C_S yleensä valitaan paljon kuormituskondensaattoria suuremmaksi. Salamasyöksyjännitteen rinnankesto-aikaa T_1 ja selän puoliarvon aikaa T_2 voidaan arvioida seuraavilla likiarvokaavoilla:

$$T_1 = 1,2\mu s \approx 3,0R_D \frac{C_S (C_B + C_L)}{C_S + C_B + C_L} \quad (15)$$

$$T_2 = 50\mu s \approx 0,7R_E (C_S + C_B + C_L) \quad (16)$$

Kaavojen perusteella vaimennusvastuksen resistanssi R_D ja kuormituspiirin kapasitanssi C_B ja C_L vaikuttavat pääasiassa rinnankestoajan T_1 suuruuteen. Selän puoliarvon aika T_2

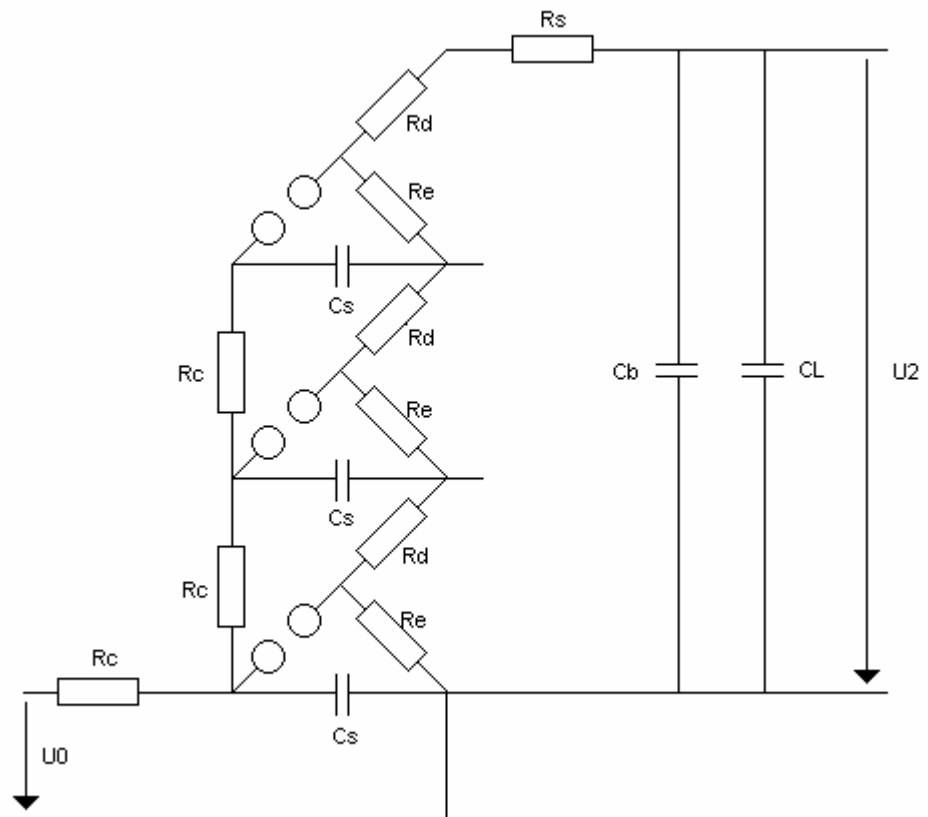
taas määräytyy pääasiassa purkausvastuksen resistanssin R_E ja syöksykondensaattorin kapasitanssin C_S perusteella.

3.2.2 Moniportainen rakenne

Latausjännite saadaan huomattavasti suuremmaksi tekemällä generaattorista moniportainen eli kytkemällä peruspiirejä päällekkäin (kuva 14). Ensimmäisen moniportaisen syöksyjännitegeneraattorin kehitti saksalainen insinööri Erwin Marx (1893 - 1980) vuonna 1923. Tästä syystä sitä kutsutaan myös Marxin generaattoriksi.

Porrasmaisessa generaattorissa pulssikondensaattorit varataan rinnakkain haluttuun jännitteeseen, jonka jälkeen ne puretaan sarjassa. Näin saadaan aikaiseksi suurempia impulssijännitteitä. N-portaisen generaattorin summajännitteeksi saadaan

$$\sum U = nU_0 \quad (17)$$



Kuva 14 Kolmiportainen syöksyjännitegeneraattori

Moniportaista syöksyjännitegeneraattoria voidaan kuvata yksiportaisella sijaiskytkennällä jolloin yksiportaisen mallin kaavat pätevät myös moniportaisen generaattorin arvoihin. Yksiportaisen sijaiskytkennän arvot n-portaisella generaattorilla saadaan laskettua seuraavasti (pilkulliset sijaiskytkennän arvoja):

$$U'_0 = nU_0 \quad (18)$$

$$C'_s = \frac{C_s}{n} \quad (19)$$

$$R'_D = nR_D + R_s \quad (20)$$

$$R'_E = nR_E \quad (21)$$

$$C'_B = C_B \quad (22)$$

Tässä työssä on keskitytty yksiportaisen salamasyöksyjännitteitä tuottavaan generaattoriin, sillä TKK:n suurjännitelaboratorioon valmistettavan generaattorin jännitealueelle ei tarvita moniportaista rakennetta.

4 Komponentit

Rakennettavan impulssigeneraattorin halutaan tuottavan salamasyöksyjännitteitä, joiden huippuarvot ovat välillä 1-20 kV. Testikappaleiden kapasitanssit puolestaan vaihtelevat joistain sadoista pikofaradeista viiteen nanofaradiin. Syöksykapasitanssin haluttiin olevan suuri, noin 1 μF , jotta kuormituksen vaihtelut eivät vaikuttaisi suuresti syöksyjännitteen muotoon.

4.1 Kytkin

Perinteisesti syöksyjännitegeneraattoreissa on käytetty kytkiminä kipinävälejä. Etenkin hyvin suurien jännitteiden ollessa kyseessä kipinäväli on toimiva ja edullinen ratkaisu. Tässä työssä päädyttiin kuitenkin kipinävälin sijasta puolijohdekytkimeen, jolloin ulostuleva pulssi on laskettavissa Laplace-muunnoksen avulla ja impulssigeneraattoria voidaan käyttää myös kalibraattorina.

Kytkimen valintaan vaikuttivat sen kestävä maksimijännite sekä maksimivirta. Kalibraattoritoiminnon vuoksi kytkimen tuli olla myös riittävän nopea. Hinta vaikutti myös omalta osaltaan valintaan. Generaattoriin tilattiin Behlkeltä MOSFET-kytkin HTS 241-40, jonka suurin sallittu jännite on 24 kV ja virta 400 A. MOSFET-kytkimen etuna kalibraattorikäytössä on se, että se voidaan mallintaa johtavana ollessaan yhdellä lähes muuttumattomalla vastuksella. Kyseisellä kytkimellä tämä vastuksen arvo on noin 0,3 Ω .

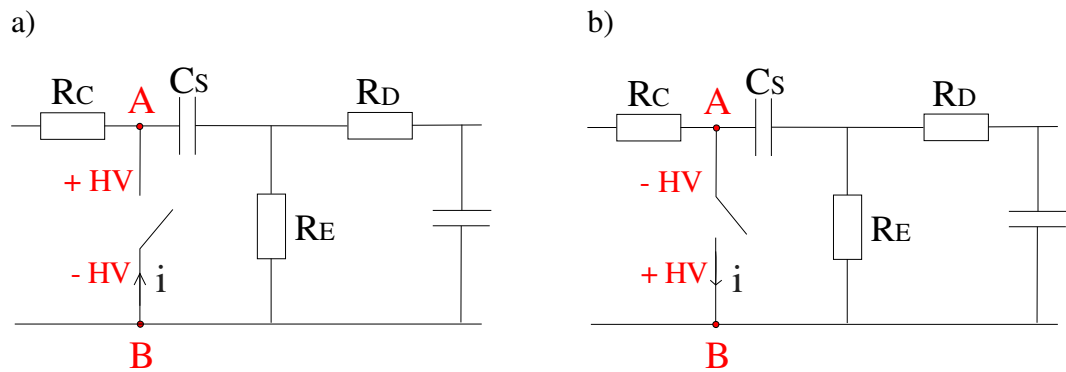
Kytkintä ei saatu tämän diplomityön aikana, joten diplomityön mittauksissa on käytetty samalla toimintaperiaatteella toimivaa HTS 21-50 kytkintä, jolla maksimijännite on 2 kV ja virta 500 A.

4.1.1 Kytkimen kääntäminen

MOSFET-kytkin toimii ainoastaan virran toiseen kulkusuuntaan. Testauksessa kuitenkin tarvitaan sekä positiivisia että negatiivisia impulssijännitteitä eli kytkimen pitää ge-

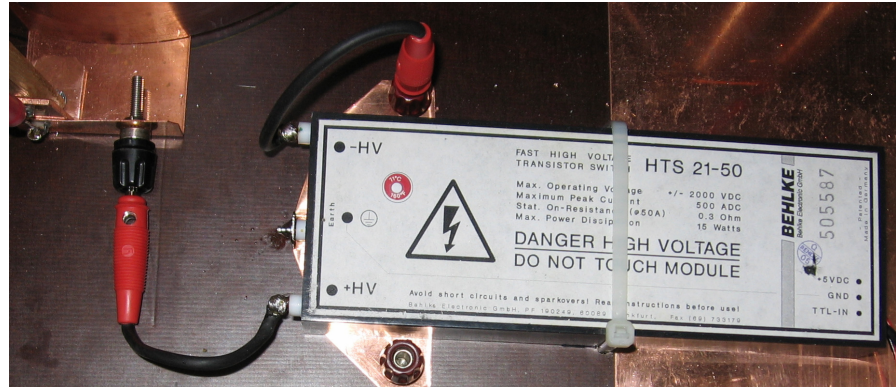
neraattoripiirissä toimia molempiin suuntiin. Tämän vuoksi kytkimen pitää olla helposti käännettävissä.

Kuvissa 15a ja 16a on esitetty kytkimen kytkentä positiivisella latausjännitteellä U_0 kytkimen +HV - liitin on kytketty pisteeseen A ja -HV -liitin on kytketty maihin (B). Negatiivisella latausjännitteellä kytkin kytketään toisinpäin (kuvat 15b ja 16b).

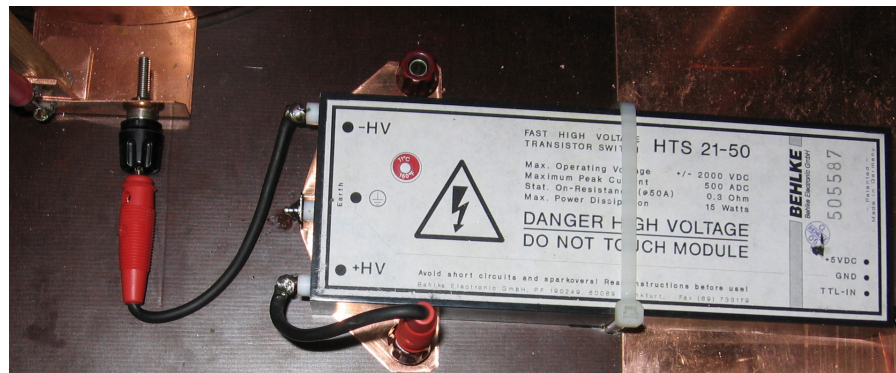


Kuva 15 a) Kytkimen asento positiivisella latausjännitteellä b) kytkimen asento negatiivisella latausjännitteellä

a)



b)



Kuva 16 a) Kytkimen liitännät positiivisella latausjännitteellä b) Kytkimen liitännät negatiivisella latausjännitteellä

4.2 Suurjännitekondensaattorit

Kytken pien virrankesto rajoittaa syöksykondensaattorin arvoa. Toisaalta syöksykondensaattori kannattaa valita paljon suuremmaksi kuin kuormituskondensaattori ja kuorman kapasitanssi yhteensä, koska tällöin saadaan aikaiseksi parempi hyötysuhde (kaava 14).

Syöksykondensaattorin C_S arvoksi valittiin $0,65 \mu\text{F}$, jolloin haluttu impulssimuoto saadaan aikaiseksi kuorman ollessa maksimissaan 5 nF . Impulssimuodon pysyminen halutuissa rajoissa kuormakapasitanssin vaihdellessa saadaan aikaiseksi kuorman kanssa rinnan olevilla kahdella kuormituskondensaattorilla C_B . Nämä kuormituskondensaattorit ovat suuruudeltaan 2 nF ja niistä on kytkettynä joko toinen tai molemmat jolloin koe-kappaleen kanssa on rinnan joko 2 nF tai 4 nF . Kuorman ollessa suurimmillaan 5 nF on

kytkettynä ainoastaan toinen kuormituskondensaattori. Kuorman ja kuormituskondensaattoreiden muodostama kapasitanssi on siis maksimissaan 7 nF. Kuvassa 17 on rakennetussa syöksyjännitegeneraattorissa käytetyt kuormituskondensaattorit.



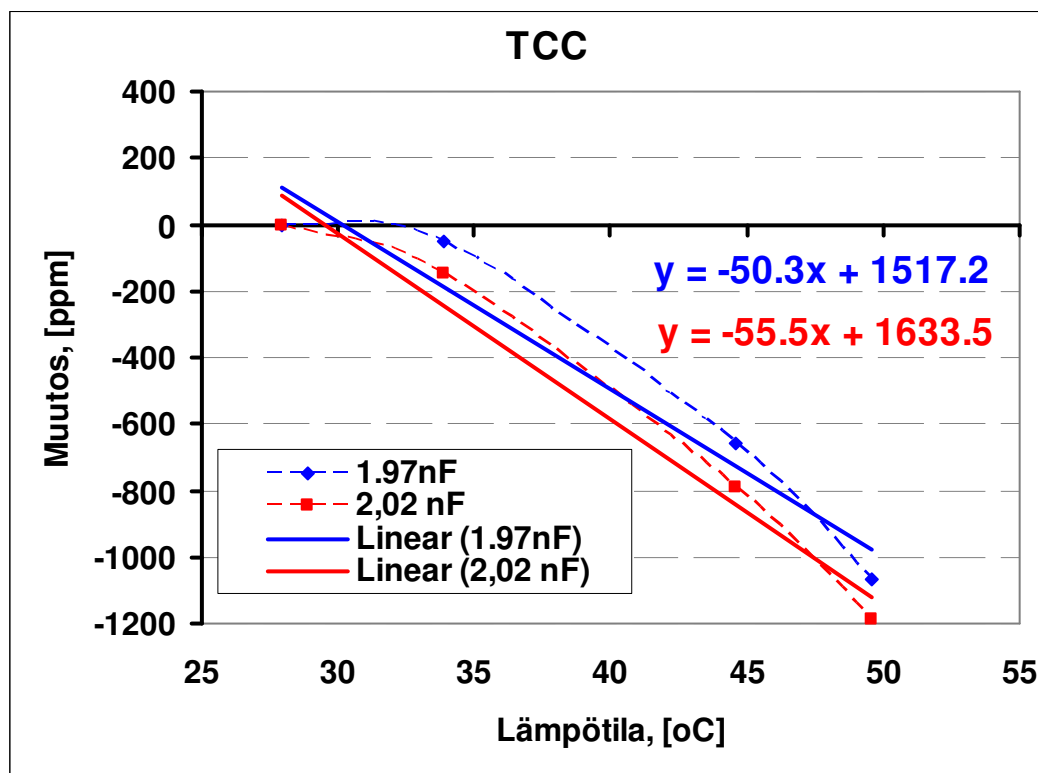
Kuva 17 Kuormituskondensaattorit

4.2.1 Kondensaattorien lämpötilariippuvuudet

Kalibraattoritoiminnan vuoksi kondensaattorien lämpötilariippuvuuksien täytyy olla tunnettuja ja mahdollisimman pieniä. Laitteeseen valittujen kondensaattoreiden kapasitanssi muuttuu vain hieman lämpötilan kasvun mukana. Valmistajan mukaan lämpötila-alueella -25 °C - $+85\text{ °C}$ kapasitanssin muutos on luokkaa 1-2 %. Taulukossa 3 on mitaustulokset kuormituskondensaattorien kapasitanssien arvoista eri lämpötiloissa. Kuvassa 18 on mitaustuloksista saatu kuvaaja kapasitanssien lämpötilariippuvuuksista. Mittausten perusteella 2 nF:n kondensaattorien tarkoiksi arvoiksi saatiin 1,98 nF sekä 2,02 nF. Näiden kondensaattoreiden lämpötilakertoimeksi TCC mitattiin -50 ppm/°C 1,98 nF:n kondensaattorille ja -56 ppm/°C 2,02 nF:n kondensaattorille.

Taulukko 3 Kuormakapasitanssien tarkat arvot eri lämpötiloissa

Kapasitanssi	Lämpötila [°C]					
	15,6	20,2	27,9	33,9	44,6	49,6
1,98 nF	1,97	1,9705	1,9706	1,9705	1,9693	1,9685
2,02 nF	2,0206	2,02	2,0209	2,0206	2,0193	2,0185



Kuva 18 Kuormakapasitanssien riippuvuus lämpötilasta

4.3 Tasajännitelähde

Tasajännitelähteen valinnassa haluttiin virta-annon olevan tarpeeksi suuri, jotta 0,65 μF syöksykondensaattorin varaamiseen haluttuun jännitteeseen kuluu korkeintaan puoli minuuttia.

$$Q = CU = It \quad (23)$$

$$I = \frac{CU}{t} = \frac{0,65\mu\text{F} * 21\text{kV}}{30\text{s}} = 455\mu\text{A}$$

Valitun 30 kV:n tasajännitelähteen virta-anto on 1,5 mA, joten syöksykondensaattori saadaan varattua haluttuun jännitteeseen aina alle puolen minuutin.

Lisäksi jännitelähteen haluttiin olevan polariteetiltaan kääntyvä, jotta sillä voidaan varata kondensaattori sekä positiivisesti että negatiivisesti. Hankitun Glassmanin (LIITE 2) jännitelähteen polariteetin muutosta varten kansi täytyy avata ja vaihtaa kahden suurjännitemoduulin paikkaa keskenään. Jotta vaihto voitaisiin tehdä ilman jännitelähteen avaamista, olisi mahdollista rakentaa vaihtokytkin, jonka avulla polariteetin vaihto suoritetaan.

4.4 Vaimennusvastus R_D ja purkausvastus R_E

Syöksykondensaattorin ollessa $0,65 \mu F$ ja kuormana olevan sekä kuormituskondensaattorien yhteenlasketun kapasitanssin vaihdellessa välillä 4-7 nF, tarvittavien suurjännitepulssivastusten optimaalisiksi arvoiksi saadaan kaavojen (15) ja (16) perusteella

$$1,2\mu s \frac{0,65\mu F + 7nF}{3 * 0,65\mu F * 7nF} \leq R_D \leq 1,2\mu s \frac{0,65\mu F + 4nF}{3 * 0,65\mu F * 4nF}$$

$$\Rightarrow R_D \approx 58 - 100\Omega$$

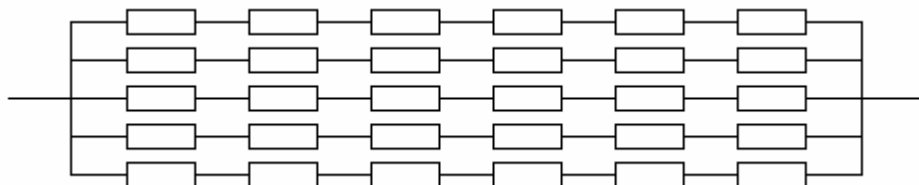
$$\frac{50\mu s}{0,7 * (0,65\mu F + 7nF)} \leq R_E \leq \frac{50\mu s}{0,7 * (0,65\mu F + 4nF)}$$

$$\Rightarrow R_E \approx 109\Omega$$

Vastusten arvoiksi valittiin E12 sarjasta 75 Ω ja 120 Ω .

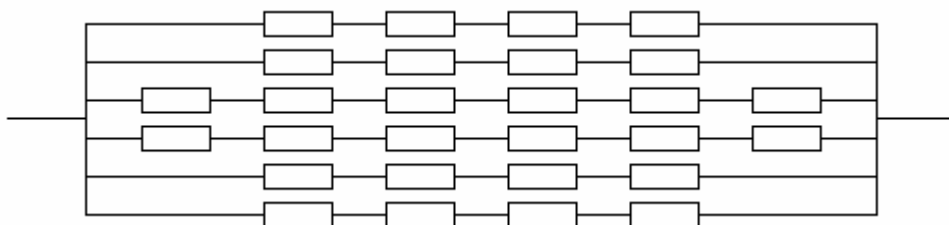
Vastusten valinnassa oli olennaista pieni lämpötilariippuvuus ja jänniteriippuvuus. Valitut vastukset ovat Nicrom Electronicin 100 Ω :n pulssivastuksia (LIITE 3). Niiden jännitekesto on 11 kV ja tehonkesto 2 W. 100 μs :n pituisella pulssilla vastuksen energiankestoksi on ilmoitettu 8 J. Vastuksien toleranssi on 5 %. Näitä 100 Ω :n vastuksia sarjaan ja rinnan kytkemällä saadaan aikaiseksi 75 Ω :n ja 120 Ω :n vastuspiirit, joiden jännitteen- sekä tehonkestit ovat riittävät.

120 Ω saadaan laittamalla rinnan viisi kuuden vastuksen sarjakytkentää (kuva 19). Tällöin yhdessä vastuksessa pulssin aikana kulunut energia on noin 4 J, joka on riittävän pieni vastuksen keston kannalta.



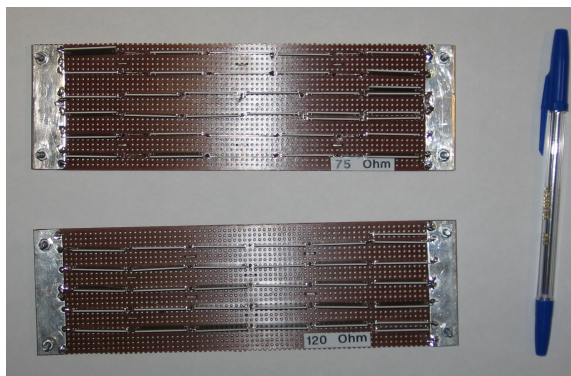
Kuva 19 120 Ω :n vastuspiiri

75 Ω saadaan laittamalla rinnan kaksi kuuden vastuksen sarjakytkentää sekä neljä neljän vastuksen sarjakytkentää (kuva 20). Yhden vastuksen energiahäviö on myös tässä tapauksessa maksimissaan noin 4 J.

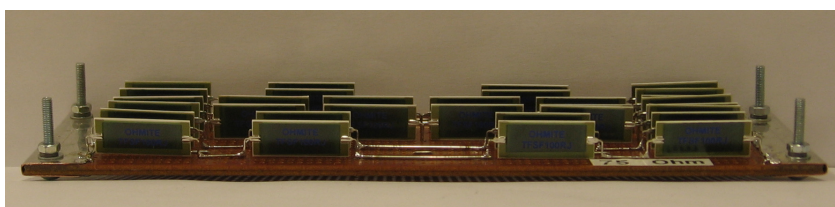


Kuva 20 75 Ω :n vastuspiiri

Valmistajan ilmoittaman mukaan vastuksien resistanssin muutos lämpötilan vaikutuksesta on 100 ppm/°C. Valmiiden vastuspiirien (kuvat 21 ja 22) lämpötilariippuvuudet mitattiin. Taulukossa 4 on esitetty mittaustulokset vastuspiirien resistanssien arvoista eri lämpötiloissa. Kuvassa 23 on mittaustulosten perusteella saatu kuvaaja vastuspiirien resistanssien lämpötilariippuvuuksista. Mittausten perusteella 75 Ω :n piirin lämpötilakerroin TCR on 126 ppm/°C ja 120 Ω :n piirin 121 ppm/°C.



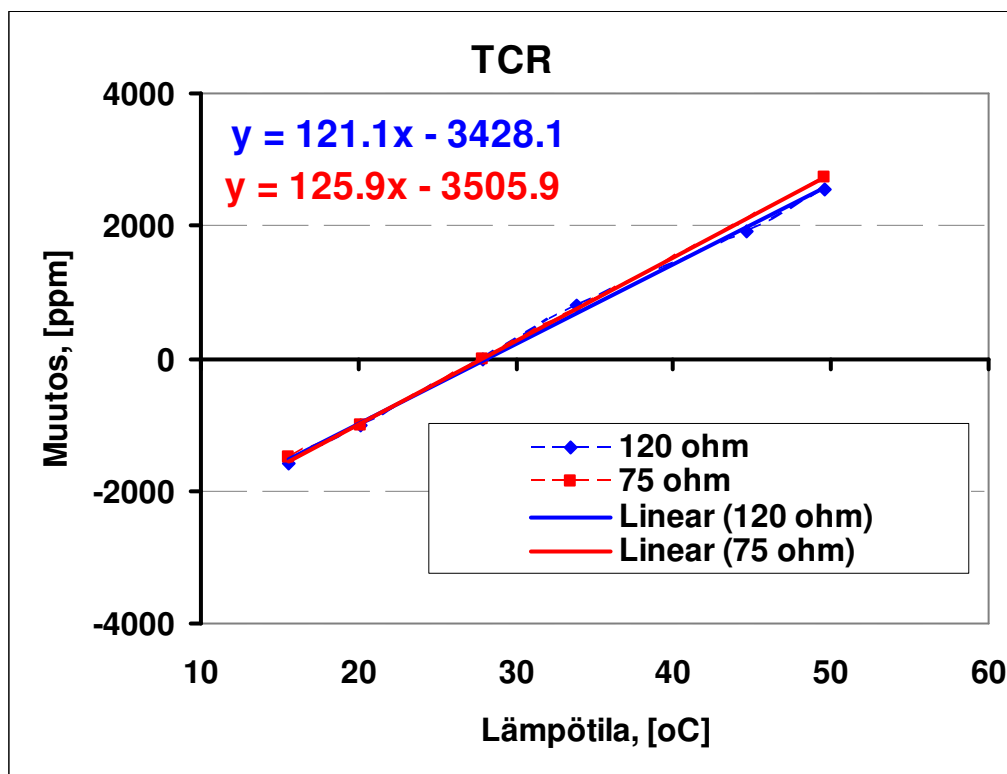
Kuva 21 75 Ω :n ja 120 Ω :n vastuspiirit



Kuva 22 75 Ω :n vastuspiiri

Taulukko 4 Vastuspiirien resistanssien tarkat arvot eri lämpötiloissa

Resistanssi	Lämpötila [$^{\circ}\text{C}$]					
	15,6	20,2	27,9	33,9	44,6	49,6
120 ohm	119,458	119,529	119,649	119,743	119,88	119,953
75 ohm	74,6423	74,677	74,7535			74,9588

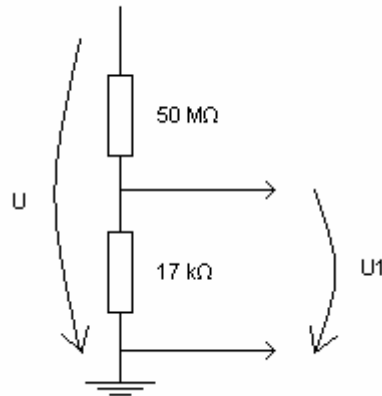


Kuva 23 Vastuspiirien resistanssien riippuvuus lämpötilasta

4.5 Jännitteenjakaja

Pulssikondensaattoriin varatun jännitteen tarkan arvon mittaamiseksi tarvitaan jännitteenjakaja, jotta mitattava jännite olisi tarpeeksi pieni mittalaitteelle. Jännitteenjakaja on kahden vastuksen sarjakytkentä, jonka yli jännite jakaantuu vastusarvojen suhteessa. Toisen vastuksen ollessa paljon pienempi saadaan sen yli mitattava jännite pieneksi.

Syöksyjännitegeneraattorissa käytettävä jännitteenjakaja muodostuu 50 MΩ:n ja 17 kΩ:n vastusten sarjaankytkennästä. Jännitteiden suhde on noin 2900, jolloin mitattava jännite on luokkaa 7 V. Kuvassa 24 on esitelty periaatekuva kyseisestä jännitteenjakajasta.



Kuva 24 Jännitteenjakaja

50 MΩ:n vastus on Rox-4 metallioksidivastus (LIITE 4). Vastuksen toleranssi on $\pm 10\%$. Jänniteriippuvuus on -4 ppm/V ja lämpötilariippuvuus $200 \text{ ppm/}^\circ\text{C}$. Maksimijännite on 30 kV eli riittää hyvin sovellukseen. Tehonkesto huoneenlämpötilassa on 12 W. Maksimitehoksi vastuksen yli sovelluksessa saadaan

$$P_{\max} = \frac{U^2}{R_2} \approx \frac{(21 \text{ kV})^2}{50 \text{ M}\Omega} \approx 8,8 \text{ W} \quad (24)$$

eli tehonkesto on riittävä.

17 kΩ:n vastus rakennetaan kolmen 51 kΩ:n metallikalvovastuksen rinnankytkennästä (LIITE 5). Näiden MFR1/2W vastusten toleranssi on 1%. Maksimijännite on 350 V. Tämä on riittävä, sillä vastusten yli oleva jännite sovelluksessa on maksimissaan

$$U_{1,\max} = \frac{R_1}{R_1 + R_2} U_{\max} = \frac{17 \text{ k}\Omega}{17 \text{ k}\Omega + 50 \text{ M}\Omega} 21 \text{ kV} \approx 7,1 \text{ V} \quad (25)$$

Vastusten lämpötilariippuvuus on 50 ppm/°C ja jännitteen vaikutus vastusarvoon on pieni. Tehonkesto on 0,5 W eli rinnankytkennän yli 1,5 W. Vastusten yli olevan jännitteen ollessa pieni tehonkesto ei ole ongelma.

$$P_{\max} = \frac{U_{1,\max}^2}{R_1} = \frac{(7,1V)^2}{17k\Omega} \approx 3,0mW \quad (26)$$

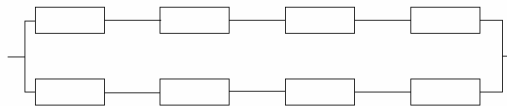
Mitattavan jännitteen U_1 perusteella saadaan jännitteenjaon avulla syöksykondensaattorin yli olevaksi jännitteeksi

$$U = \frac{R_1 + R_2}{R_1} U_1 = \frac{17k\Omega + 50M\Omega}{17k\Omega} U_1 \approx 2942 * U_1 = Sf * U_1 \quad (27)$$

missä kerroin Sf on jakajan skaalauskerroin.

Todellisuudessa myös mittari vaikuttaa skaalauskerroimen arvoon. Tämän vuoksi jakajan skaalauskerroin Sf määritettiin mittauksin (LIITE 6). Mittausten perusteella jakajan skaalauskerroin riippuu voimakkaasti jännitteestä. Jännitteellä 1 – 20 kV skaalauskerroin vaihteli välillä 2990 – 2995.

Jänniteriippuvuuden pienentämiseksi jakajan yläjännitepuolta vahvistettiin lisäämällä siihen seitsemän 50 MΩ Rox-4 metallioksidivastusta. Vastukset liitettiin kuvan 25 mukaisesti, jolloin yläjännitepuolen resistanssi $R_2 = 100 \text{ M}\Omega$. Uuden jakajan alajännitepuoli koostuu kolmesta sarjaankytketystä vastuksesta. Alajännitepuolen resistanssi $R_1 = 50 \text{ k}\Omega$.



Kuva 25 Jakajan yläjännitepuolen vastukset, yhteensä 100 MΩ

Uudella jännitteenjakajalla skaalauskerroimeksi mitattiin (mittarin kanssa) $S_f = 2088,20 \pm 0,001$

Skaalauskerroin ohjelmoitiin mittariin, jotta se näyttää suoraan syöksykondensaattorin latausjännitteen kilovoltteina. Mittarin ominaisuuksista on kerrottu liitteessä 8.

4.6 Latausvastus

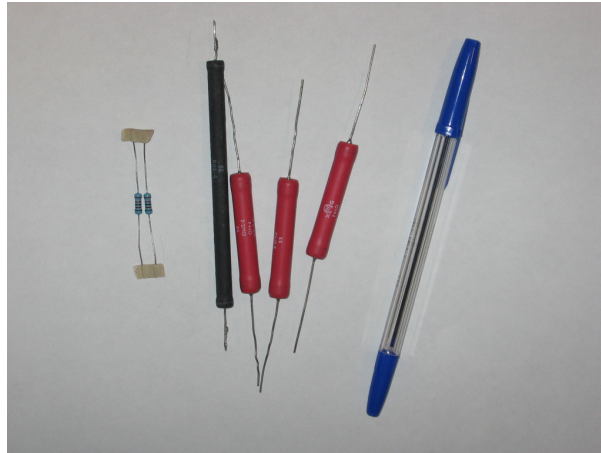
Latausvastuksella rajoitetaan jännitelähteestä saatavaa virtaa sekä suojataan jännitelähdettä kytkimen ollessa kiinni. Latausvastuksena käytetään kolmen 2,2 M Ω :n paksukalvovastus F44D:n (LIITE 7) sarjakytkentää, jolloin kokonaislatausvastus on 6,6 M Ω . Latausvastuksena käytettävien paksukalvovastuksien jännitekesto on ilmaeristeessä 14 kV eli kolmen vastuksen yli saa olla korkeintaan jännite 42 kV. Rakennettavassa generaattorissa tämä jännite on maksimissaan 21 kV.

Tehonkesto näillä vastuksilla on 1,3 W eli yhteensä latausvastus kestää tehon 3,9 W. Sovelluksessa latausvastuksessa kuluva hetkellinen teho on maksimissaan

$$P = \frac{U_{\max}^2}{R} = \frac{(21kV)^2}{6,6M\Omega} \approx 66,8W$$

Vaikka hetkellinen teho onkin huomattavasti annettua tehonkestoja suurempi, on tämä teho lyhytaikainen, jolloin vastuksien voidaan olettaa kestävän kyseisen tehon.

Vastuksien toleranssi on $\pm 5\%$. Vastusten lämpötilariippuvuus on -2000 ppm/ $^{\circ}\text{C}$ ja jänniteriippuvuus on alle 25 ppm/V.



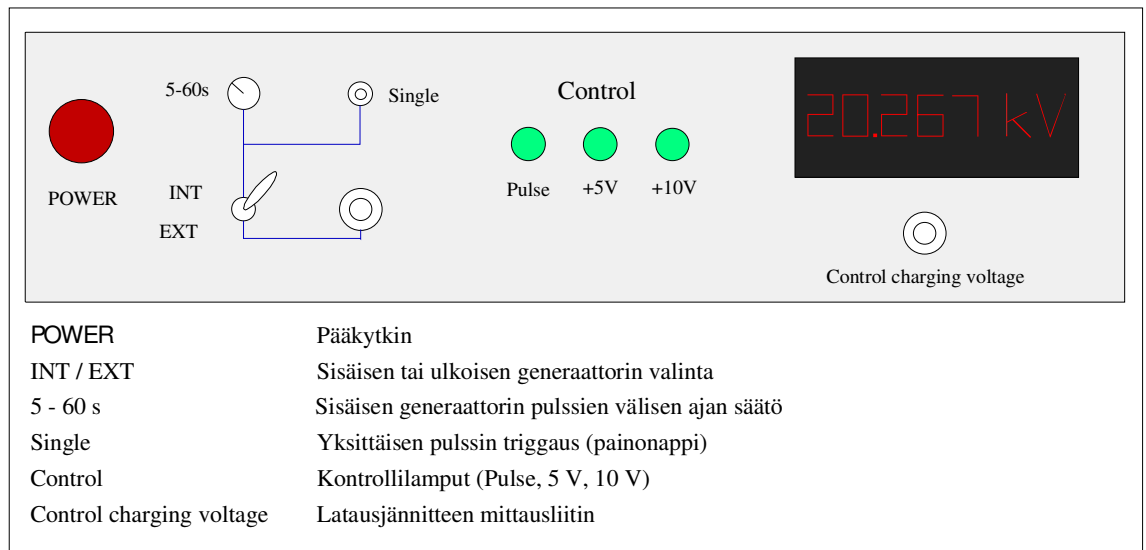
Kuva 26 Syöksyjännitegeneraattorissa käytetyt vastukset. Vasemmalta: Jännitteenjakajaan 51 k Ω (2 kpl) ja 50 M Ω , latausvastukseen 2,2 M Ω (3 kpl)

4.7 Ohjauselektronikka

Ohjauspaneelistä (kuva 27) voidaan valita kytkimen ohjaamiseen joko sisäinen tai ulkoinen generaattori (INT tai EXT). Sisäisellä generaattorilla on mahdollista säätää pulssien väli 5 – 60 sekuntiin tai valita yksittäinen pulssi (single). Pulssien välisen ajan valinnassa tulee ottaa huomioon syöksykapasitanssin latautumiseen kuluva aika, joka kaavan (23) mukaisesti riippuu halutusta jännitearvosta

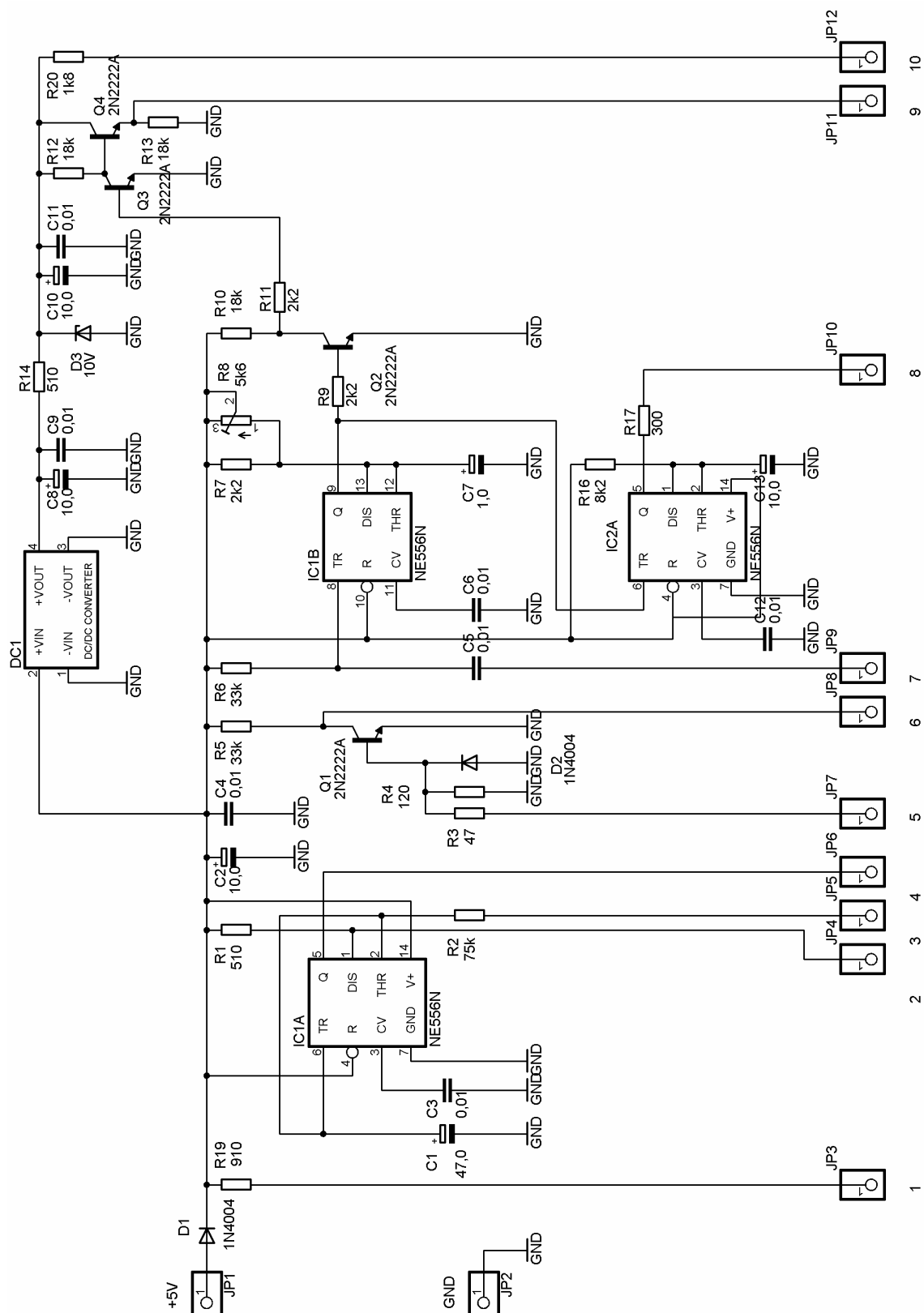
$$t = \frac{C_s U_0}{I}$$

Sisäisen ohjausgeneraattorin piirikaavio on esitetty kuvassa 28. Tarkemmat tiedot itse piirilevystä löytyvät liitteestä 9.



Kuva 27 Ohjauspaneeli

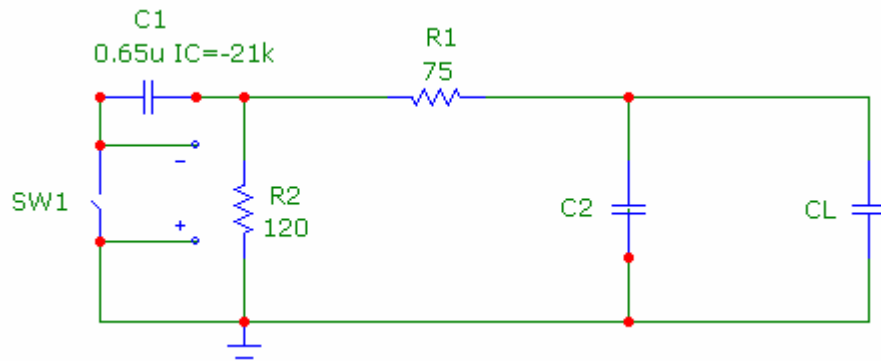
Ohjauspaneelistä löytyy liittimet ulkoiselle generaattorille sekä syöksykapasitanssin latausjännitteen mittaukseen (Control charging voltage). Paneelissa oleva mittari näyttää myös latausjännitteen, mutta tarvittaessa voidaan mitata tarkempi arvo liittimen kautta. Liittimen kautta mitattu arvo täytyy kertoa jännitteenjakajan skaalauskerroimella S_f .



Kuva 28 Ohjausgeneraattori

5 Simuloinnit lasketuilla komponenttiarvoilla

Syöksyjännitegeneraattorille luvussa 4 lasketuilla komponenttiarvoilla on simuloitu jännitteen aaltomuotoja ohjelmalla Micro-Cap 9. Kuvassa 29 on syöksyjännitegeneraattorin toiminnan simulointiin käytetty malli.



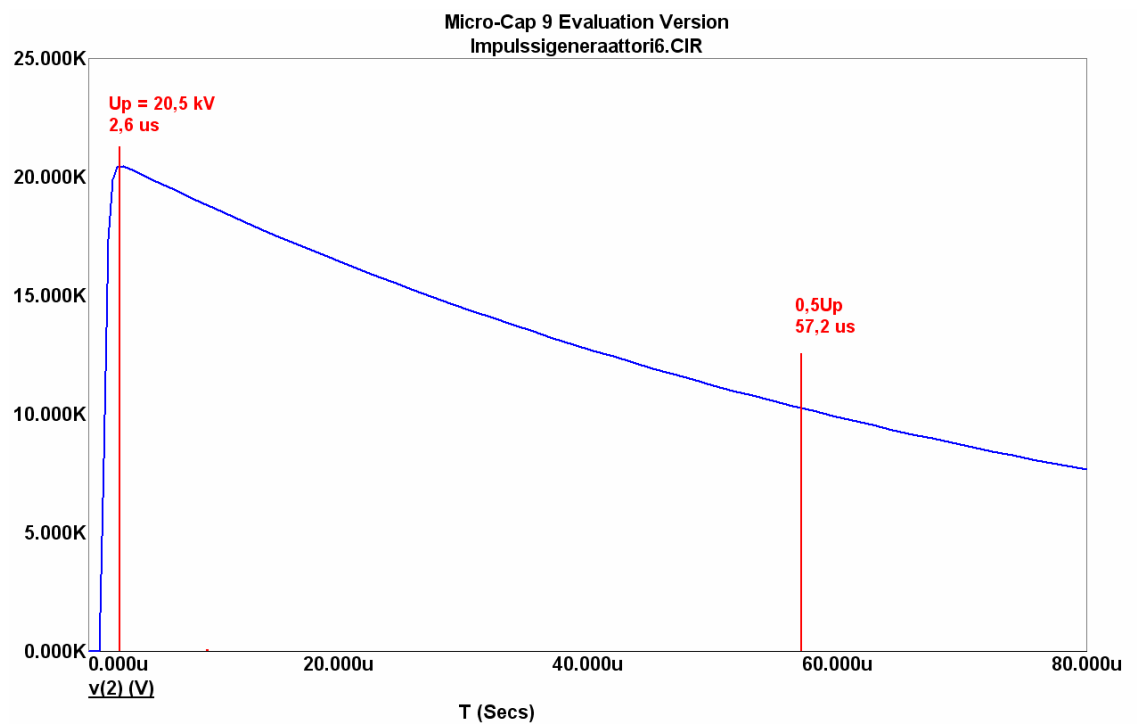
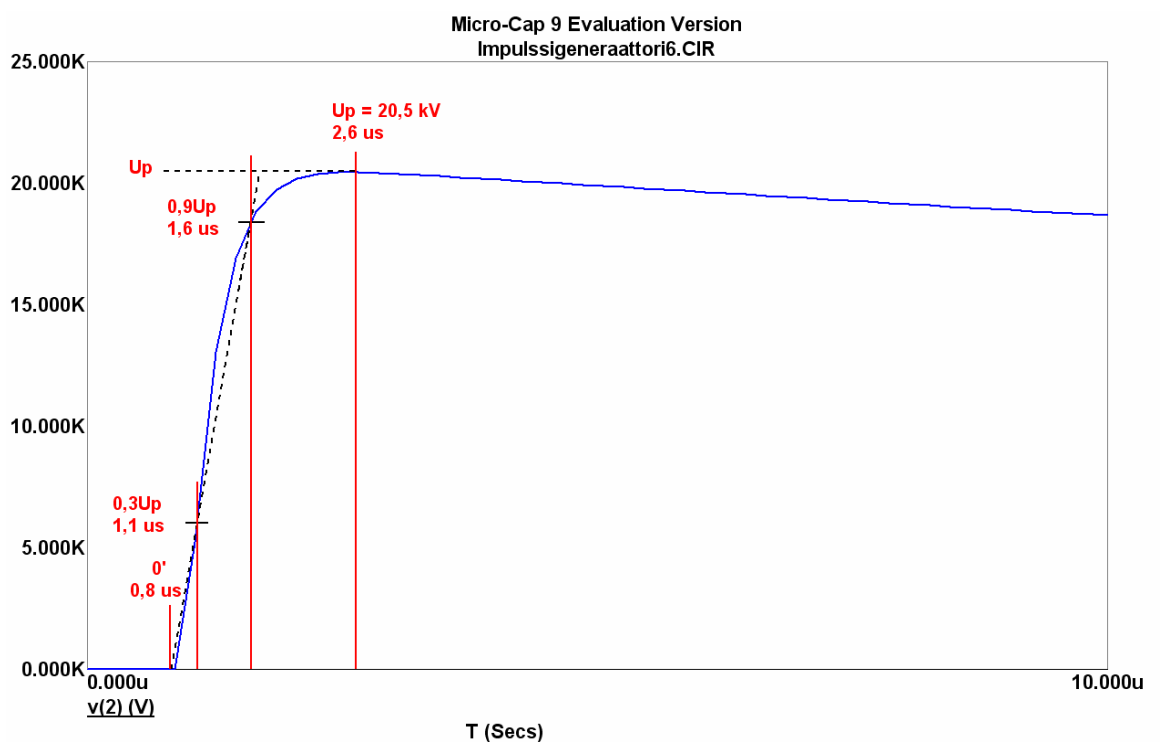
Kuva 29 Simulointimalli

Kuvissa 30 ja 31 on käytetty kuormituskondensaattorin C_B sekä kuormakapasitanssin C_L yhteenlaskettuna arvona 4 nF. Kuvan 30 perusteella on saatu ajaksi, jolloin jännite on laskenut puoleen huippuarvostaan $T_{50} = 57,2 \mu\text{s}$. Kuvasta 31 saadaan virtuaalisen origon kohdan ajaksi $T_{0'} = 0,8 \mu\text{s}$. Ajoiksi jolloin pulssin on noussut 30 % ja 90 % huippuarvosta U_p on saatu kuvan perusteella $T_{30} = 1,1 \mu\text{s}$ ja $T_{90} = 1,6 \mu\text{s}$. Kaavojen (4) ja (5) perusteella on laskettu arvot T_1 ja T_2 .

$$T_1 = 1,67 * T = 1,67 * (T_{90} - T_{30}) = 1,67 * (1,6 \mu\text{s} - 1,1 \mu\text{s}) = 0,84 \mu\text{s}$$

$$T_2 = T_{50} - T_{0'} = 57,2 \mu\text{s} - 0,8 \mu\text{s} = 56,4 \mu\text{s}$$

Luvussa 2 esitetyn standardoidun salamasyöksyjännitteen mukaisesti $T_1 = 0,84 - 1,56 \mu\text{s}$ ja $T_2 = 40 - 60 \mu\text{s}$. Simuloidut arvot ovat siis halutulla alueella.

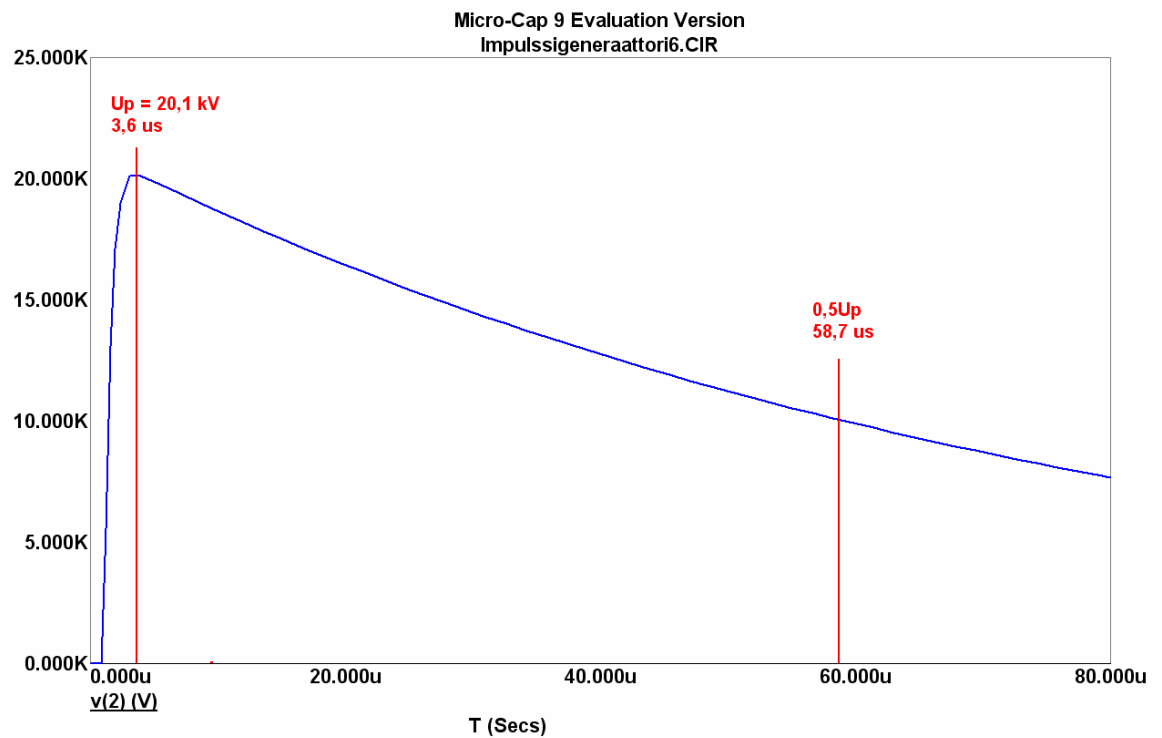
Kuva 30 Simuloitu salamasyöksyjännite, kun $C_B + C_L = 4\text{nF}$ Kuva 31 Simuloitu salamasyöksyjännite, kun $C_B + C_L = 4\text{nF}$

Kuvissa 32 ja 33 kuormituskondensaattorin C_B sekä kuormakapasitanssin C_L yhteenlaskettu arvo on 7 nF. Kuvasta 32 $T_{50} = 58,7 \mu\text{s}$. Kuvasta 33 $T_{0.7} = 0,8 \mu\text{s}$, $T_{30} = 1,2 \mu\text{s}$ ja $T_{90} = 2,0 \mu\text{s}$. Kaavojen (4) ja (5) perusteella on laskettu arvot T_1 ja T_2 .

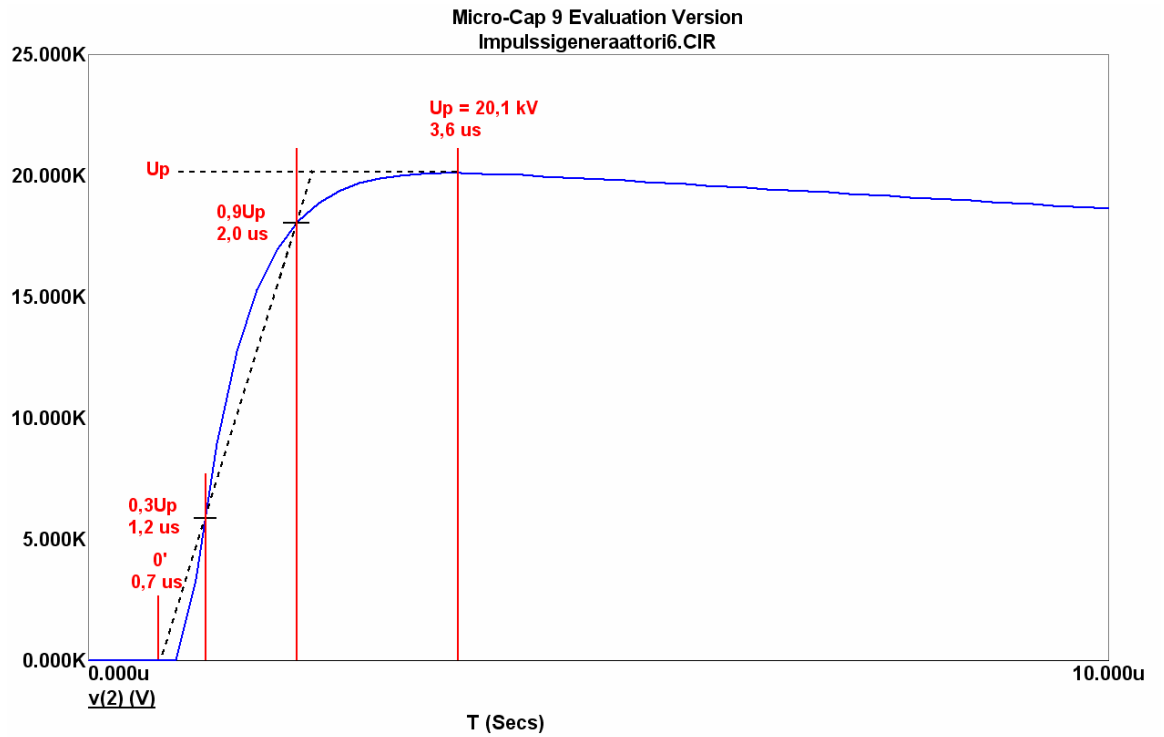
$$T_1 = 1,67 * T = 1,67 * (2,0 \mu\text{s} - 1,2 \mu\text{s}) = 1,34 \mu\text{s}$$

$$T_2 = 58,7 \mu\text{s} - 0,7 \mu\text{s} = 58,0 \mu\text{s}$$

Simulointi osoittaa, että lasketuilla komponenttiarvoilla pysytään halutuissa aikarajoissa kuorman ja kuormituskondensaattorin yhteen lasketun arvon vaihdellessa välillä 4 - 7 nF.

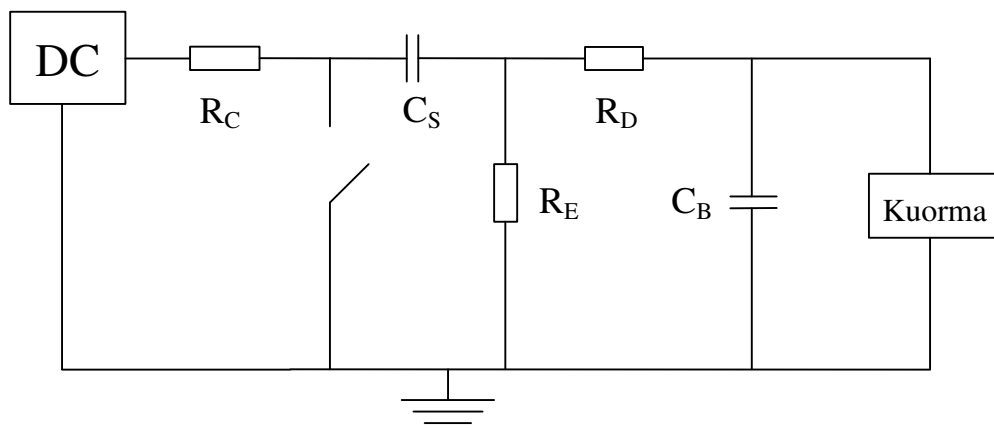


Kuva 32 Simuloitu salamasyöksyjännite, kun $C_B + C_L = 7 \text{ nF}$

Kuva 33 Simuloitu salamasyöksyjännite, kun $C_B + C_L = 7 \text{ nF}$

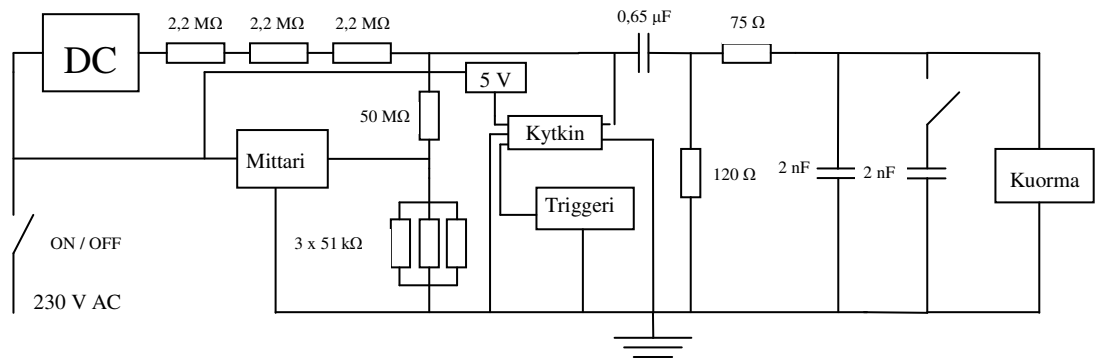
6 Mekaaninen suunnittelu

Kuvassa 34 on esitetty syöksyjännitegeneraattorin periaatteellinen rakenne. Tasajännitteellä varattu syöksykapasitanssi C_S purkautuu R_E :n, R_D :n, C_B :n ja kuorman muodostamaan piiriin kytkimen sulkeuduttua. Tällöin kuorman yli syntyy impulssimainen salamasyöksyjännite.



Kuva 34 Syöksyjännitegeneraattorin periaatteellinen rakenne

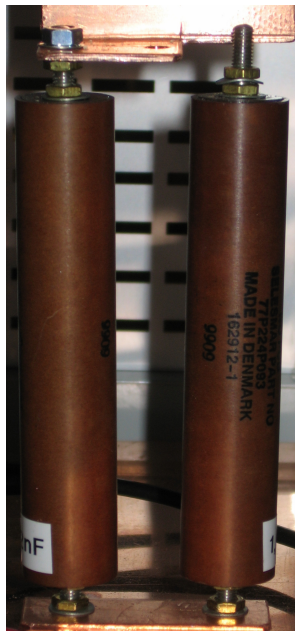
Kuvassa 35 on rakennetun MARI-1 syöksyjännitegeneraattorin piirikaavio. Latausvastus R_C muodostuu kolmesta $2,2\text{ M}\Omega$:n vastuksesta. Kuormituskondensaattori muodostuu kahdesta 2 nF :n kondensaattorista. Niistä on kuormituksesta riippuen kytkentynä piiriin yksi tai kaksi (kuva 36). Kapasitanssin latausjännitteen mittaukseen otetaan jännite jännitteenjakajalta.



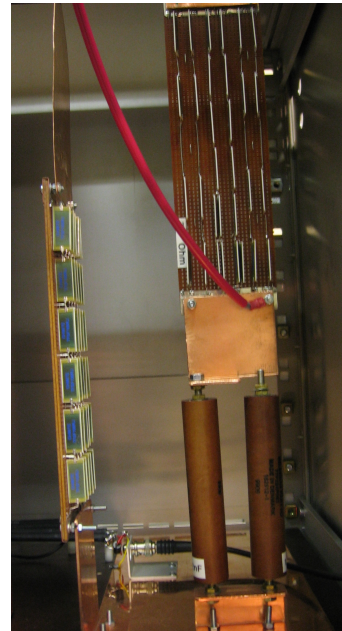
Kuva 35 Rakennetun syöksyjännitegeneraattorin rakenne

Kuvissa 36 ja 37 näkyy generaattorin komponentteja kiinnitettyinä generaattoriin.

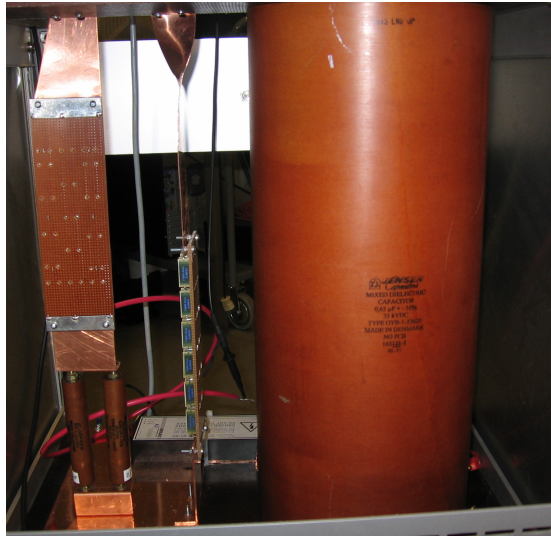
a)



b)

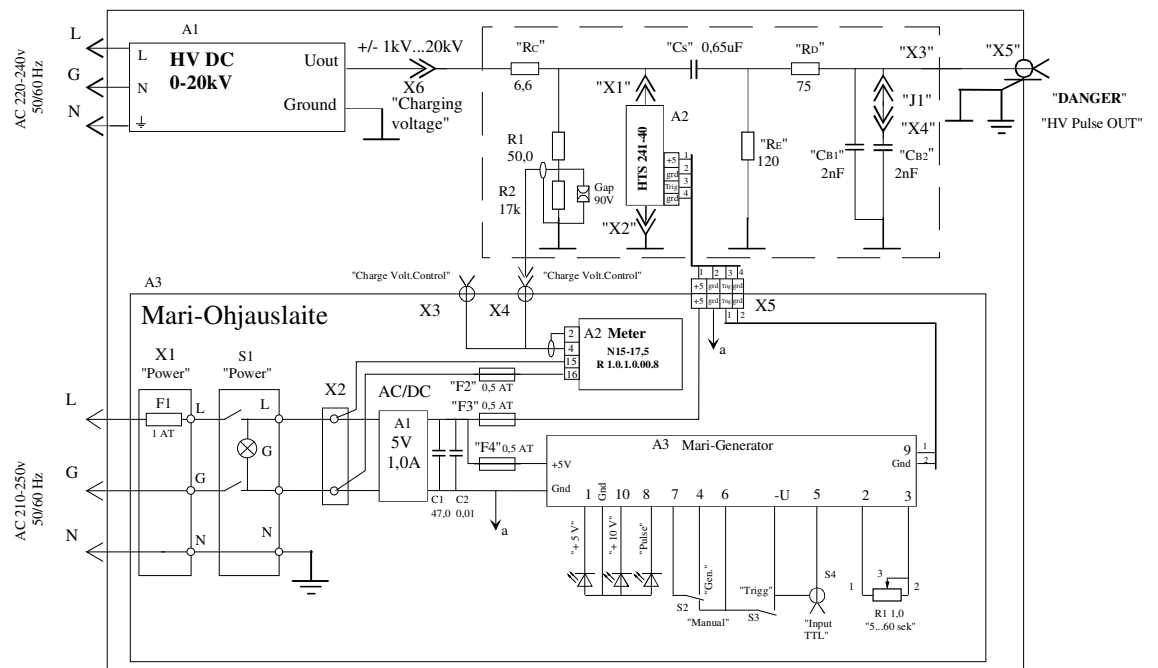


Kuva 36 a) Kuormituskondensaattorit b) Kuormituskondensaattorit sekä vastukset R_E ja R_D



Kuva 37 Oikealla syöksykapasitanssi 0,65 μ F. Vasemmalla vastukset R_E ja R_D sekä kuormituskapasitanssit

Kuvassa 38 on esitetty generaattorin täydellinen kytkentäkaavio. Mari-ohjauslaite on kytkimen ohjaukseen tarvittava elektroniikka (luku 4.7)



Kuva 38 Syöksyjännitegeneraattorin kytkentäkaavio

Syöksyjännitegeneraattorin ohjauspaneeli on kuvassa 40. Yllä on tasajännitelähteen paneeli ja alla generaattoriin rakennettu generaattorin ohjauspaneeli. Tasajännitelähteen paneelin mittareista nähdään jännite, jolla syöksykapasitanssi varataan latausvastuksen kautta. Generaattorin ohjauspaneelissa oleva mittari puolestaan näyttää syöksykondensaattorin latausjännitteen. Paneelissa on myös liitin ulkoista mittaria varten.

Paneelista voidaan säätää impulssien väliaikaa tai trigata yksittäinen pulssi. Myös kytkimen ohjaaminen ulkoisella signaalilla on mahdollista liittimen kautta.



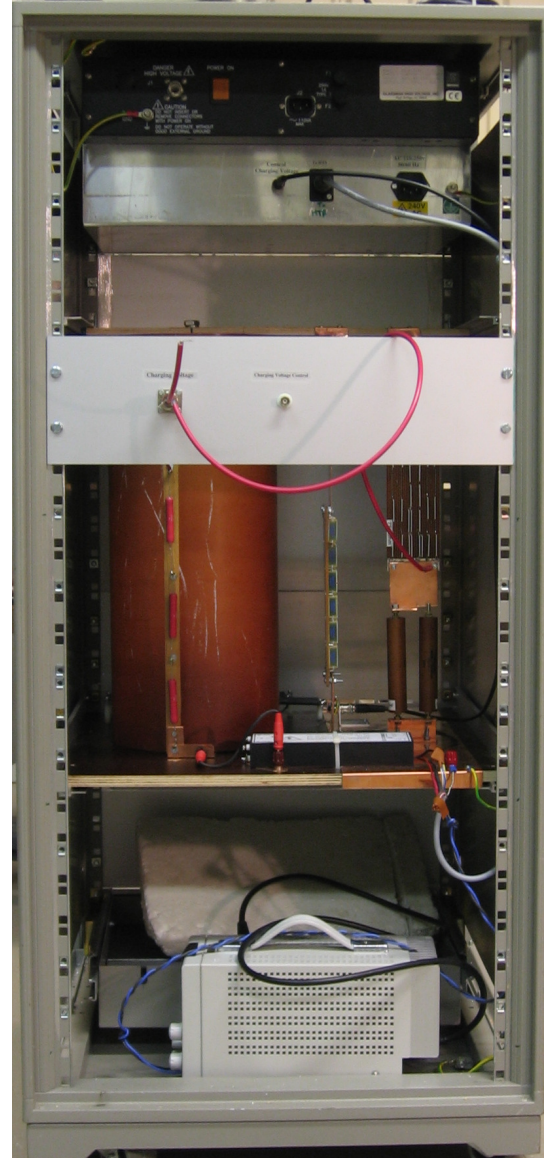
Kuva 40 Ohjauspaneeli

Kuvassa 41 on generaattorin takaosa. Koekappale kiinnitetään takana oleviin johtoihin. Takaosassa ovat myös kytkimen liitännät, joita joudutaan muuttamaan polariteetin vaihtuessa (Luku 4.1). Toinen kuormituskapasitansseista on kytkettynä joko piiriin tai maihin kuormituksen mukaan. Tämäkin vaihto tehdään generaattorin takaosassa tarvittaessa.

a)



b)



Kuva 41 Generaattori takaapäin a) takalevyn kanssa b) ilman takalevyä

7 Generaattorin testaus

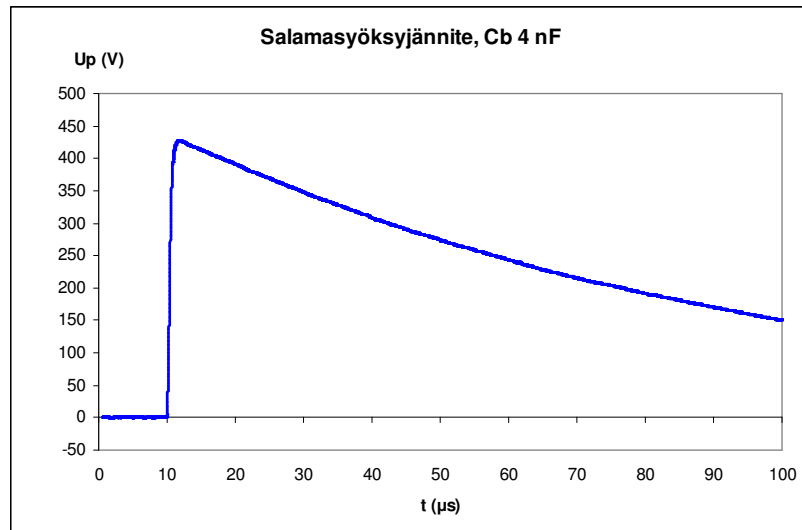
Rakennettua salamasyöksyjännitegeneraattoria testattiin ilman kuormaa positiivisella ja negatiivisella latausjännitteellä. Latausjännite U_0 oli +/- 500 V. Mittaukset tehtiin sekä yhdellä että kahdella kuormituskondensaattorilla C_B eli kuormituksena oli 2 nF tai 4 nF. Jokaisesta mittausvaihtoehdosta mitattiin oskilloskoopilla kymmenen impulssin sarja, joista LeCroy WaveSurfer –ohjelman avulla saatiin suoraan impulssien rinnankestoajat T_1 ja selän puoliarvonajat T_2 . Taulukossa 5 on esitetty saatujen tuloksien keskiarvot.

Taulukko 5 20 kV:n salamasyöksyjännitegeneraattorin tuottamien impulssien mittaustulokset.

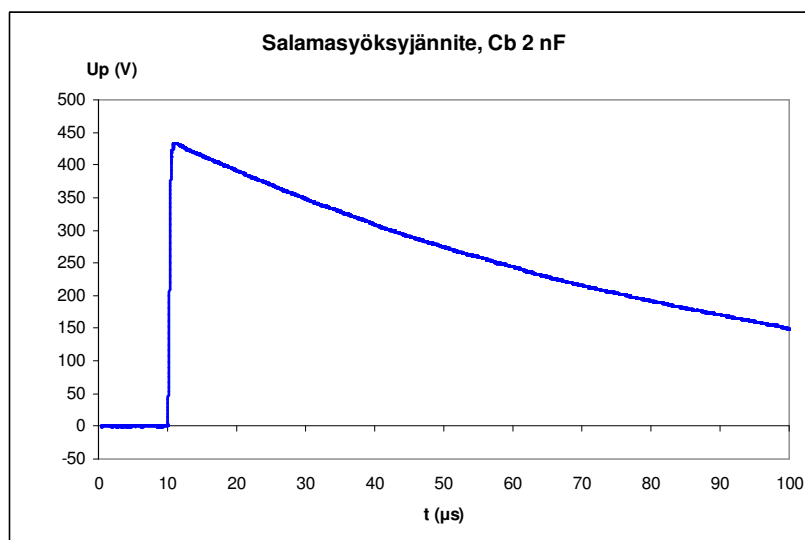
	C_B	U_p (V)	T_1 (μs)	T_2 (μs)
POS	2 nF	434,79	0,42	58,80
NEG	2 nF	-433,93	0,41	58,90
POS	4 nF	428,75	0,84	60,06
NEG	4 nF	-427,60	0,84	60,10

Suurjännitetestauskäytössä generaattorin kuormituskondensaattorien ja kuorman yhteenlaskettu kapasitanssi on välillä 4 – 7 nF. Testimittauksissa ei käytetty lainkaan kuormaa, joten yhdellä kuormituskapasitanssilla (2 nF) mitatut impulssit eivät vastaa tulevassa käytössä olevaa tilannetta. Näiden impulssien rinnankestoajat olivatkin aivan liian lyhyitä salamasyöksyjännitteelle. Kahdella kuormituskondensaattorilla (4 nF) taas ollaan suunnitellun käyttöalueen rajalla. Mitattujen impulssien rinnankestoajojen keskiarvoksi saadaan tässä tapauksessa 0,84 μs, mikä on standardoidun salamasyöksyjännitteen pienin sallittu arvo rinnankestoajalle. Myös simuloimalla (Luku 5) saatiin rinnankestoajalle sama tulos. Selän puoliarvonaika T_2 sitävastoin oli simuloimalla 56,4 μs ja mittauksilla todellisella laitteella arvoksi saatiin 60,10 μs. T_2 saa standardin mukaan vaihdella välillä 40 – 60 μs. Kuormituksen kapasitanssin lisääntyessä myös selän puoliarvonaika kasvaa, joten tällöin sallittu arvo tulee ylittymään hieman enemmän. Selän puoliarvonaikaa voidaan pienentää pienentämällä purkausvastuksen R_E arvoa.

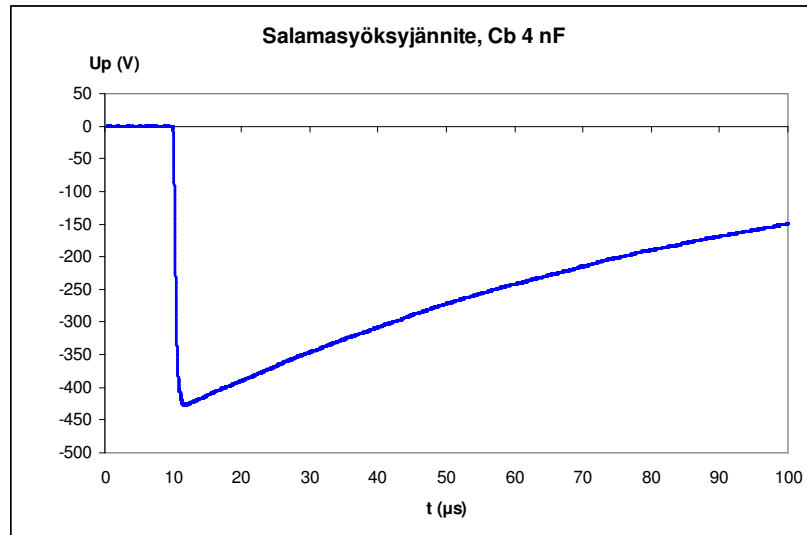
Kuvissa 42- 45 on esitetty esimerkipulssit jokaisesta mittausvaihtoehdosta.



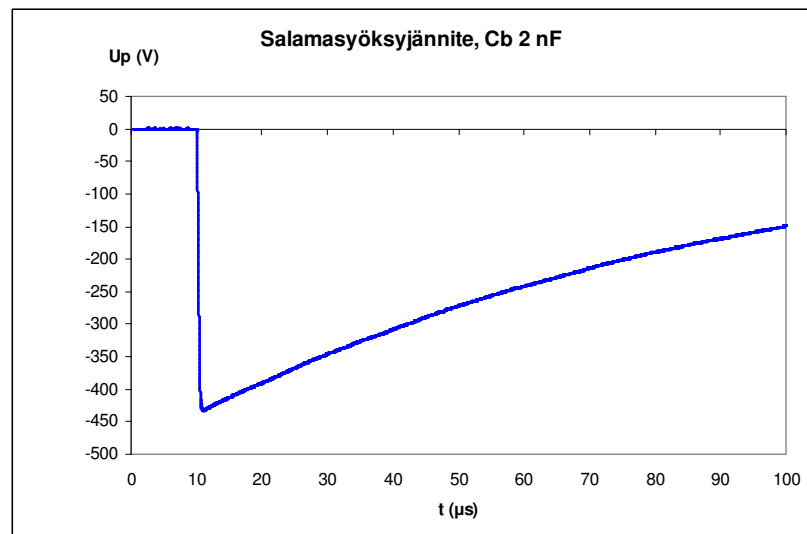
Kuva 42 20 kV:n salamasyöksyjännitegeneraattorin tuottama pulssi, kun $U_0 = 500$ V ja $C_b = 4$ nF



Kuva 43 20 kV:n salamasyöksyjännitegeneraattorin tuottama pulssi, kun $U_0 = 500$ V ja $C_b = 2$ nF



Kuva 44 20 kV:n salamasyöksyjännitegeneraattorin tuottama pulssi, kun $U_0 = -500$ V ja $C_b = 4$ nF

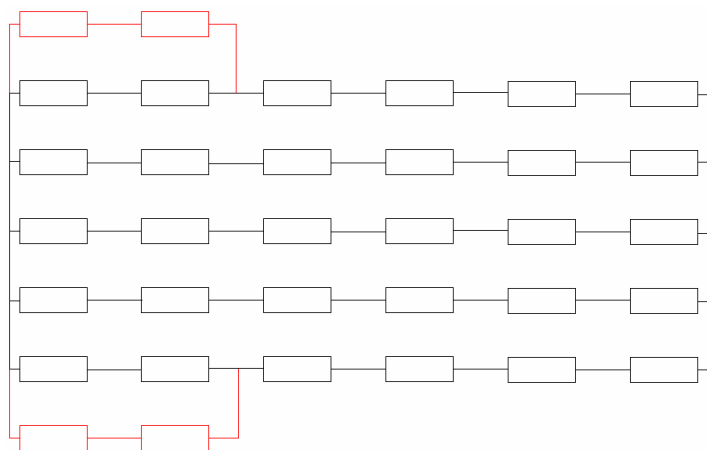


Kuva 45 20 kV:n salamasyöksyjännitegeneraattorin tuottama pulssi, kun $U_0 = -500$ V ja $C_b = 2$ nF

8 Yhteenveto

Diplomityön tarkoituksena oli kehittää 1 - 20 kV:n alueella toimiva salamasyöksyjännitegeneraattori. Valmis laite MARI-1 testattiin 500 V:n latausjännitteellä. Suurempaa jännitettä ei voitu käyttää, sillä testaushetkellä käytössä ollut kytkimen kesto oli vain 2 kV ja lisäksi käytettävissä ollut oskilloskoopille menevä kaapeli kesti ainoastaan 500 V. Tulevaisuudessa laitteessa oleva kahden kilovoltin kytkin vaihdetaan 24 kV:n kytkimeen sen saapuessa.

Laitteen testaus osoitti, että MARI-1 generaattori tuottaa halutunmuotoisia impulsseja. Selän puoliarvonaika T_2 oli tosin hieman liian pitkä. Lisäämällä purkausvastukseen R_E neljä 100 Ω :n vastusta kuvan 46 osoittamalla tavalla, saadaan vastuksen resistanssiksi $R_E \approx 111 \Omega$. Purkausvastuksen resistanssia pienentämällä saadaan lyhennettyä selän puoliarvonaikaa T_2 . Simuloimalla saadaan uudella purkausvastuksen R_E arvolla täydellä kuormalla ($C_B + C_L = 7$ nF) selän puoliarvonajaksi 54 μ s, kun se alkuperäisellä purkausvastuksen arvolla oli 58 μ s (Luku 5). Muutos lyhentää siis selän puoliarvon aikaa noin 4 μ s.



Kuva 46

Syöksyjännitteen polariteettia vaihtaessa täytyy kytkein kytkeä toisinpäin sekä vaihtaa tasajännitelähteen polariteetti. Jännitelähteen polariteetin vaihtaminen työlästä, sillä jännitelähteen sisältä täytyy vaihtaa kahden suurjännitemoduulin paikkaa. Polariteetin vaihdon helpottamiseksi olisi mahdollista rakentaa jännitelähteeseen vaihtokytkin, jonka avulla sen polariteetti voitaisiin vaihtaa etupaneelistä. Toinen vaihtoehto olisi hankkia toinen vastaava jännitelähde, jolloin toista käytettäisiin positiivisena ja toista negatiivisena lähteenä.

9 Lähdeluettelo

Aro Martti, J. E. (2003). *Suurjännitetekniikka, 2. painos*. Espoo: Oy Yliopistokustannus / Otatieto.

Elovaara, J. (2007). Eristyskoordinaatio sekä vaara- ja häiriöjännitteet, luentokalvot.

Gallagher T. J., A. J. (1983). *High voltage: Measurement, Testing and Design*. John Wiley & Sons LTd.

Hällström Jari (2002). *A Calculable Impulse Voltage Calibrator*. Acta Polytechnica Scandinavica, Helsinki University of Technology, Dissertation for the degree of Doctor of Science in Technology.

IEC 60060. (1989). *High-voltage test techniques, Part I: General definitions and test requirements*. International Electrotechnical Commission.

IEC 60060. (1994). *High-voltage test techniques, Part 2: Measuring systems*. International Electrotechnical Commission

IEC 60071-1. (1993). *Insulation co-ordination, Part I: Definitions, principles and rules*. International Electrotechnical Commission.

Ilmatieteen laitos. Haettu Tammikuu 2008 osoitteesta www.ilmatieteenlaitos.fi

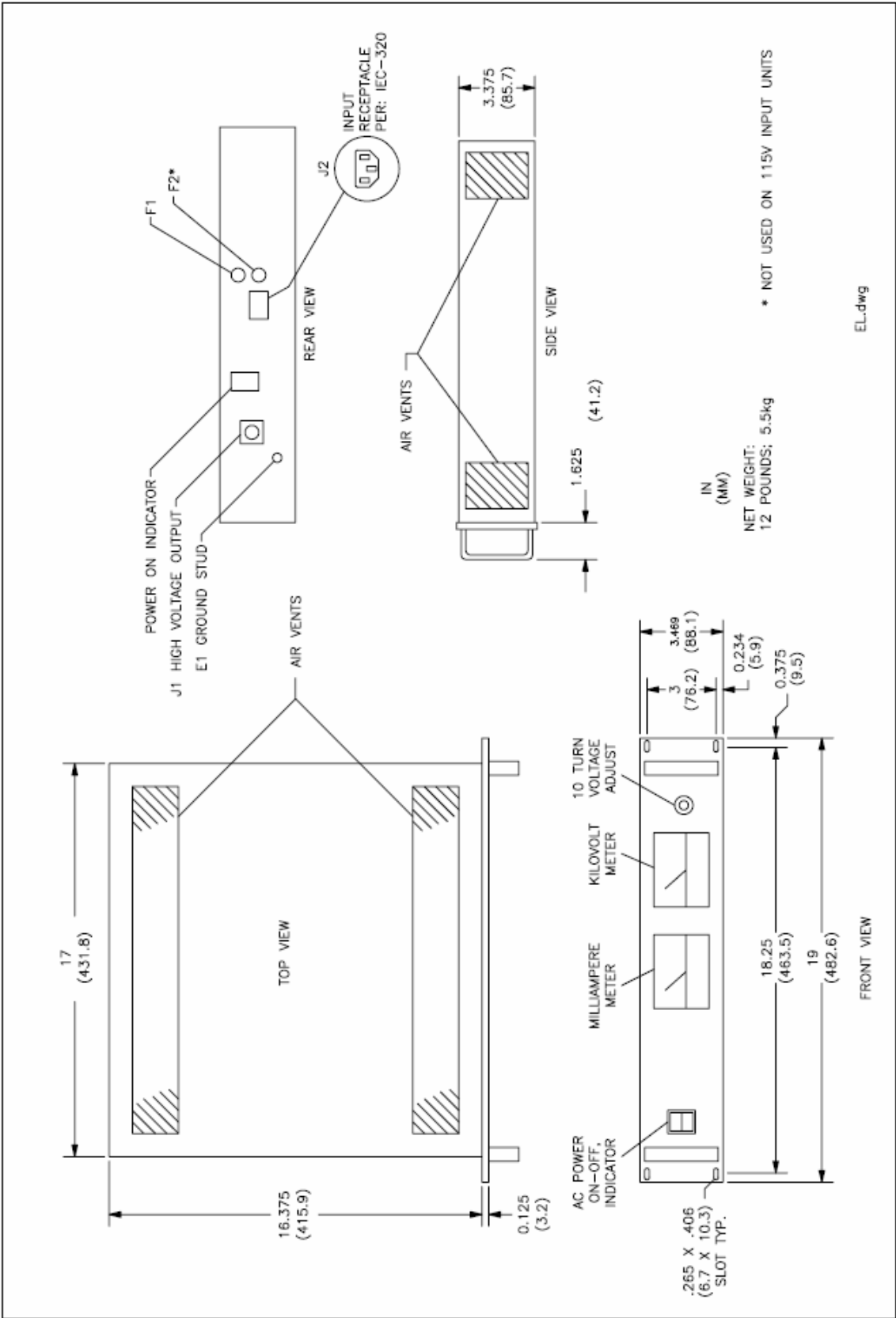
Minović Miloje, P. S. (1992). *Hochspannungstechnik*. vde-verlag gmbh.

Ryan, H. M. (2001). *IEE Power and energy series 32: High voltage engineering and testing, 2nd edition*. The Institution of Electrical Engineers.

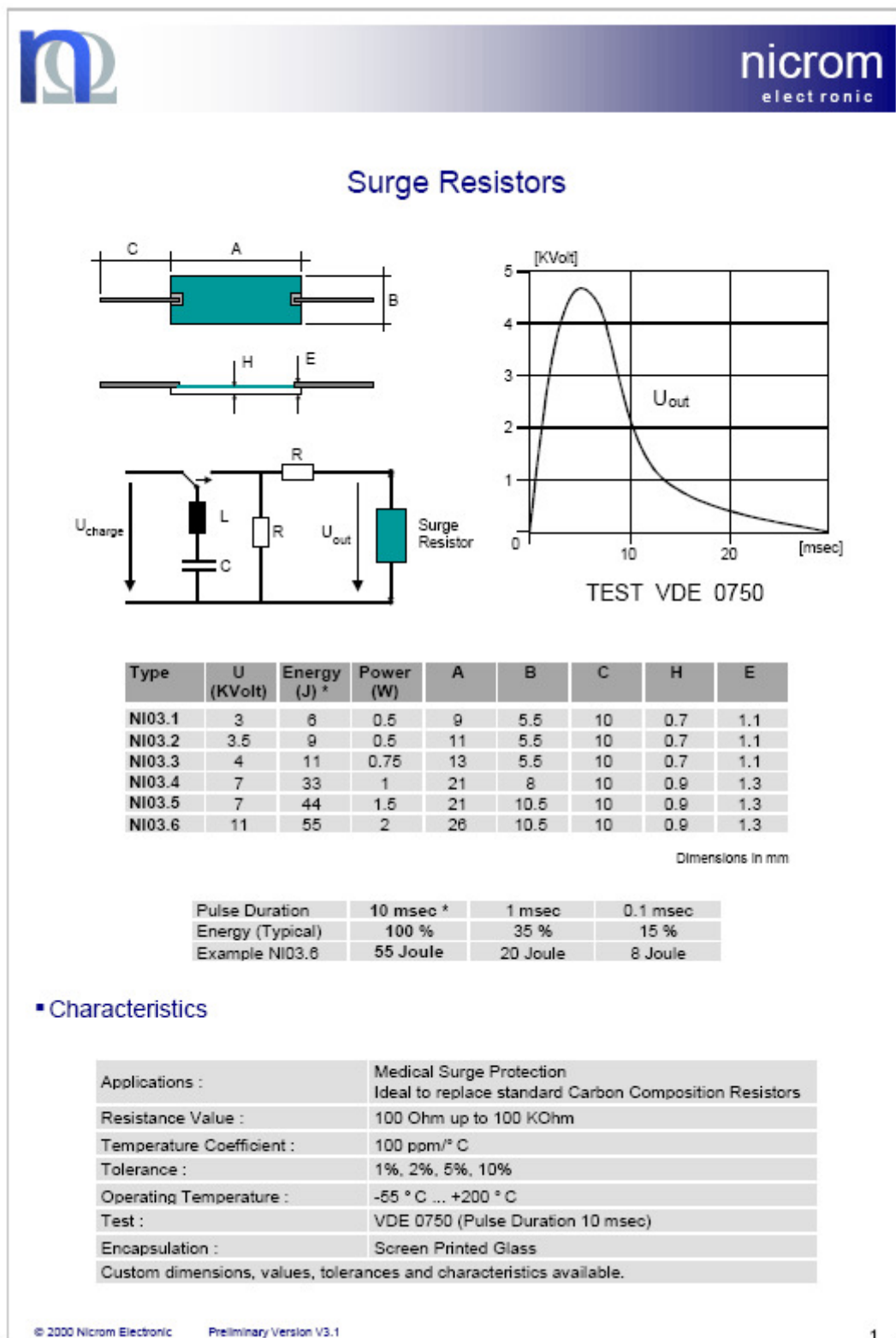
LIITE 1: Standardoidut eristystasot (IEC 60071-1)

Laitteen korkein käyttöjännite (kV)	Lyhytaikainen käyttötaajuinen vaihtojännite (kV)	Salamasyökyjännite (kV)
3,6	10	20 40
7,2	20	40 60
12	28	60 75 95
17,5	38	75 95
24	50	95 125 145
36	70	145 170
52	95	250
72,5	140	325
123	(185) 230	450 550
145	(185) 230 275	(450) 550 650
170	(230) 275 325	(550) 650 750
245	(275) (325) 360 395 460	(650) (750) 850 950 1050

LIITE 2: Glassman tasajännitelähde EL30R01.5



LIITE 3: Pulssivastus NIO3.6:n tekniset tiedot



LIITE 4: Metallioksidivastus Rox-4:n tekniset tiedot

MODEL ROX Metal Oxide Resistors High Voltage, Special Purpose



FEATURES

- Low T.C.: $\pm 200\text{PPM}/^\circ\text{C}$ standard. $\pm 100\text{PPM}/^\circ\text{C}$, $\pm 50\text{PPM}/^\circ\text{C}$ available.
- Tolerances: $\pm 10\%$, $\pm 5\%$, $\pm 2\%$, $\pm 1\%$
- For oil bath or open air operation
- Matched sets available
- Special testing available upon request

STANDARD ELECTRICAL SPECIFICATIONS

MODEL	WATTAGE RATING*			MAXIMUM VOLTAGE	RESISTANCE RANGE (Ohms)**			
	25°C	70°C	125°C		T.C. $\pm 200\text{PPM}/^\circ\text{C}$	T.C. $\pm 100\text{PPM}/^\circ\text{C}$	T.C. $\pm 50\text{PPM}/^\circ\text{C}$	NON-INDUCTIVE T.C. $\pm 200\text{PPM}/^\circ\text{C}$
ROX-1/2	2.0	1.40	1.0	2.0KV	1k-1G0	1k-100M	1M-100M	—
ROX-3/4	3.0	2.16	1.5	5.0KV	1k-4G0	1k-500M	1M-100M	100-20M
ROX-1	4.0	2.88	2.0	7.5KV	1k-5G0	1k-500M	1M-100M	100-20M
ROX-1-1/2	5.0	3.60	2.5	11.0KV	1k-7.5G	1k-500M	1M-100M	100-20M
ROX-2	6.0	4.32	3.0	15.0KV	1k-10G	1k-1G	1M-500M	100-20M
ROX-3	10.0	7.20	5.0	22.5KV	1k-15G	1k-1G	1M-500M	400-20M
ROX-4	12.0	8.64	6.0	30.0KV	1k-20G	1k-1G	1M-500M	500-20M
ROX-5	16.0	11.52	8.0	37.5KV	1k-25G	1k-1G	1M-500M	500-20M
ROX-6	20.0	14.40	10.0	45.0KV	1k-30G	1k-1G	1M-500M	500-20M

* Wattage increases by 25% with .040" [1.02] lead. All resistance readings referenced at 100 VDC. Other voltages available on request. $\pm 1\%$ tolerance not available above 1G.
 ** For resistance values above and below those listed, contact factory.

ELECTRICAL SPECIFICATIONS

Insulation Resistance: 10^{11} ohm minimum.

MECHANICAL SPECIFICATIONS

Terminal Strength: 10 pound pull test.

Solderability: Continuous satisfactory coverage when tested in accordance with MIL-STD-202, Method 208.

MATERIAL SPECIFICATIONS

Element: High temperature fired cermet film.

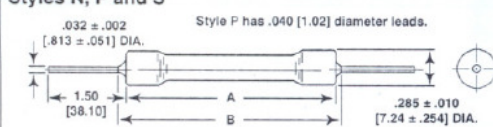
Core: High purity 96% alumina, tubular or solid.

Coating: Blue flameproof, black silicone available.

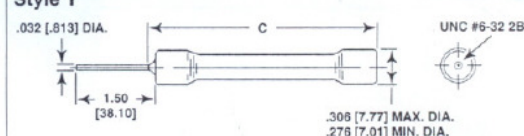
Termination: Standard lead material is solder-coated copper; solderable and weldable. .032" and .040" available, Style P .040" only.

DIMENSIONAL CONFIGURATIONS [Numbers in brackets indicate millimeters]

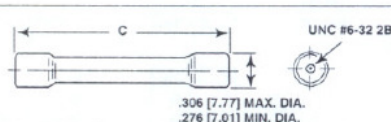
Styles N, P and S



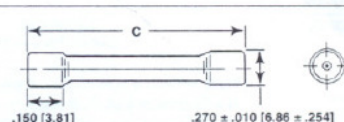
Style Y



Style T



Style Z



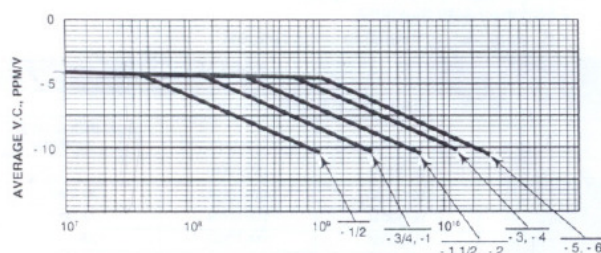
MODEL	STYLE N, P, S		STYLE T	STYLE Y	STYLE Z
	A	B	C	C (Max.)	C
ROX-1/2	.600 \pm .032 [15.24 \pm .813]	.700 [17.78]	NA	NA	NA
ROX-3/4	.800 \pm .032 [20.32 \pm .813]	.900 [22.86]	1.168 \pm .022 [29.72 \pm .559]	1.05 [26.67]	.780 \pm .022 [19.81 \pm .559]
ROX-1	.920 \pm .032 [23.37 \pm .813]	1.02 [25.91]	1.288 \pm .022 [32.77 \pm .559]	1.17 [29.72]	.900 \pm .022 [22.86 \pm .559]
ROX-1-1/2	1.55 \pm .032 [39.37 \pm .813]	1.65 [41.91]	1.918 \pm .022 [48.77 \pm .559]	1.80 [45.72]	1.53 \pm .022 [38.86 \pm .559]
ROX-2	2.05 \pm .032 [52.07 \pm .813]	2.15 [54.61]	2.418 \pm .022 [61.47 \pm .559]	2.30 [58.42]	2.03 \pm .022 [51.56 \pm .559]
ROX-3	3.05 \pm .032 [77.47 \pm .813]	3.15 [80.01]	3.418 \pm .022 [86.87 \pm .559]	3.30 [83.82]	3.03 \pm .022 [76.96 \pm .559]
ROX-4	4.05 \pm .032 [102.87 \pm .813]	4.15 [105.41]	4.418 \pm .022 [112.27 \pm .559]	4.30 [109.22]	4.03 \pm .022 [102.36 \pm .559]
ROX-5	5.05 \pm .032 [128.27 \pm .813]	5.15 [130.81]	5.418 \pm .022 [137.67 \pm .559]	5.30 [134.62]	5.03 \pm .022 [127.76 \pm .559]
ROX-6	6.05 \pm .032 [153.67 \pm .813]	6.15 [156.21]	6.418 \pm .022 [163.07 \pm .559]	6.30 [160.02]	6.03 \pm .022 [153.16 \pm .559]

MODEL ROX

RESISTANCE VALUE CODES							
K KILO		M MEGA		G GIGA		T TERA	
10 ³		10 ⁶		10 ⁹		10 ¹²	
VALUE	CODE	VALUE	CODE	VALUE	CODE	VALUE	CODE
1.00k	1k00	1.00M	1M00	1.00KM	1G00	1.00MM	1T00
5.50k	5k50	5.50M	5M50	5.50KM	5G50	5.50MM	5T50
9.99k	9k99	9.99M	9M99	9.99KM	9G99	9.99MM	9T99

TEMPERATURE COEFFICIENT CODE		
CODE	TEMPERATURE COEFFICIENT	RANGE
M	± 200PPM/°C	- 55°C to + 125°C
K	± 100PPM/°C	+ 25°C to + 125°C
H	± 50PPM/°C	+ 25°C to + 125°C

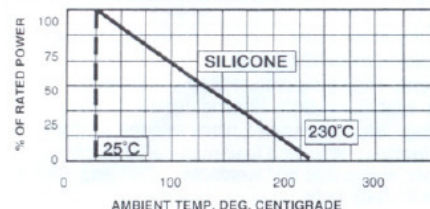
VOLTAGE COEFFICIENT



ENVIRONMENTAL PERFORMANCE

TEST	MAX. ΔR (Typical Test Lots)
Short Time Overload	< ± 0.20%
Moisture Resistance	< ± 5%
Shock	< ± 0.20%
Vibration	< ± 0.20%
Temperature Cycling	< ± 0.50%
Load Life	< ± 1.5%
Dielectric Withstanding Voltage	< ± 0.15%
Effect of Soldering	< ± 0.10%

DERATING



PART MARKING

- Company name
- Model
- Value
- Tolerance, T.C.
- Date code

HOW TO ORDER

ROX-1/2
MODEL

N
OPTIONAL
CONSTRUCTION

100M5
VALUE

F
TOLERANCE

M
TEMPERATURE
COEFFICIENT

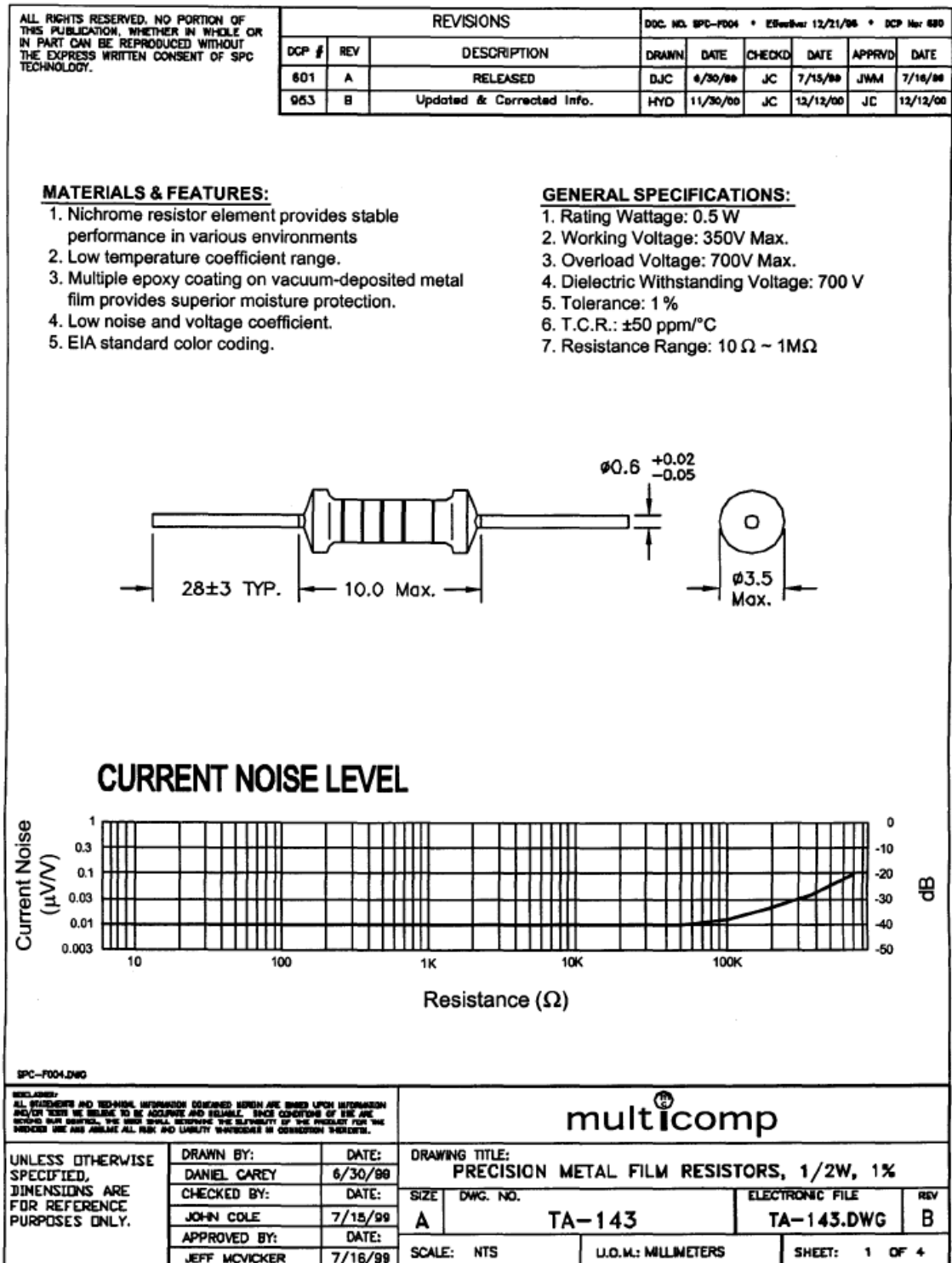
None = Silicone coated, axial leads, tubular body.
N = Silicone coated, axial leads, non-inductive.
P = Silicone coated, .040" [1.02] diameter axial leads, tubular body (Add 25% to wattage for .040" [1.02] diameter leads).
S = Silicone coated, axial terminals, solid body.
T = Silicone coated, threaded terminals, tubular body.
Y = Silicone coated, one end axial, one end threaded terminals.
Z = Silicone coated, plated ferrules, tubular body.

K = ± 10%
J = ± 5%
G = ± 2%
F = ± 1%

M = ± 200PPM/°C
K = ± 100PPM/°C
H = ± 50PPM/°C

NOTE: ± 1% tolerance not available above 1G.

LIITE 5: Metallikalvovastus MFR1/2W:n tekniset tiedot



ALL RIGHTS RESERVED. NO PORTION OF THIS PUBLICATION, WHETHER IN WHOLE OR IN PART CAN BE REPRODUCED WITHOUT THE EXPRESS WRITTEN CONSENT OF SPC TECHNOLOGY.		DOC. NO. SPC-F004 * Effective 12/21/98 * DCP No. 680																
Characteristics	Test Methods	Limits																
Temperature coefficient JIS-C-5202 5.2	Natural resistance change per temp. degree centigrade. $\frac{R_2 - R_1}{R_1(t_2 - t_1)} \times 10^6$ (ppm/°C) R1: Resistance value at room temperature (t1) R2: Resistance value at room temp. plus 100 °C (t2) Test Pattern: Room temp., Room temp. + 100 °C	Within the temperature coefficient specified below Max. T. C. R. ± 50ppm/ °C																
Dielectric withstanding voltage JIS-C-5202 5.7	Resistors shall be clamped in the trough of a 90 ° metallic V-block and shall be tested at AC potential respectively specified in the above list for 60 +10/-0 seconds.	No evidence of flashover mechanical damage, arcing or insulation breakdown.																
Temperature cycling JIS-C-5202 5.4	Resistance change after continuous five cycles for duty cycle specified <table border="1"> <thead> <tr> <th>Step</th> <th>Temperature</th> <th>Time (min)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>-55 °C ±3 °C</td> <td>30</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>Room Temp.</td> <td>10 to 15</td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>+155 °C ±2 °C</td> <td>30</td> </tr> <tr> <td>4</td> <td>Room Temp.</td> <td>10 to 15</td> </tr> </tbody> </table>	Step	Temperature	Time (min)	1	-55 °C ±3 °C	30	2	Room Temp.	10 to 15	3	+155 °C ±2 °C	30	4	Room Temp.	10 to 15	Resistance change rate is ± (1 % +0.05 Ω) Max. with no evidence of mechanical damage.	
Step	Temperature	Time (min)																
1	-55 °C ±3 °C	30																
2	Room Temp.	10 to 15																
3	+155 °C ±2 °C	30																
4	Room Temp.	10 to 15																
Short-time overload JIS-C-5202 5.5	Permanent resistance change after the application of a potential of 2.5 times RCWV for 5 seconds.	Resistance change rate is ± (0.5 % +0.05 Ω) Max. with no evidence of mechanical damage.																
Pulse overload JIS-C-5202 5.8	Resistance change after 10,000 cycles (1 second "ON", 25 seconds "OFF") at 4 times RCWV.	Resistance change rate is ± (1 % +0.05 Ω) Max. with no evidence of mechanical damage.																
Load life in humidity JIS-C-5202 7.9	Resistance change after 1,000 hours (1.5 hours "ON", 0.5 hour "OFF") at RCWV in a humidity test chamber controlled at 40 °C ± 2 °C and 90 to 95 % relative humidity.	Resistance Value	R/R															
		Normal type	± 1.5%															
		Non-Flame type	± 5%															
Load life JIS-C-5202 7.10	Permanent resistance change after 1,000 hours operating at RCWV, with duty cycle of 1.5 hours "ON", 0.5 hour "OFF" at 70 °C ± 2 °C ambient.	Resistance Value	R/R															
		Normal type	± 1.5%															
		Non-Flame type	± 5%															
Terminal strength JIS-C-5202 6.1	<u>Direct load:</u> Resistance to a 2.5kg direct load for 10 seconds in the direction of the longitudinal axis of the terminal leads. <u>Twist test:</u> Terminal leads shall be bent through 90 ° at a point of about 6mm from the body of the resistor and shall be rotated through 360 ° about the original axis of the bent terminal in alternating direction for a total of 3 rotations.	No evidence of mechanical damage.																
Resistance to soldering heat JIS-C-5202 6.4	Permanent resistance change when leads immersed to 3.2-4.8mm from the body in 350 °C ±10 °C solder for 3 ±0.5 seconds.	Resistance change rate is (1 % +.05 Ω) Max. With no evidence of mechanical damage.																
Solderability JIS-C-5202 6.5	The area covered with a new, smooth, clean, shiny and continuous surface free from concentrated pinholes. Test temp. of solder: 235 °C ±5 °C. Dwell time in solder: 3 +0.5/-0 seconds.	95% coverage Min.																
Resistance to solvent JIS-C-5202 6.9	Specimens shall be immersed in a bath of trichroethane completely for 3 minutes with ultrasonic.	No deterioration of protective coatings and markings.																

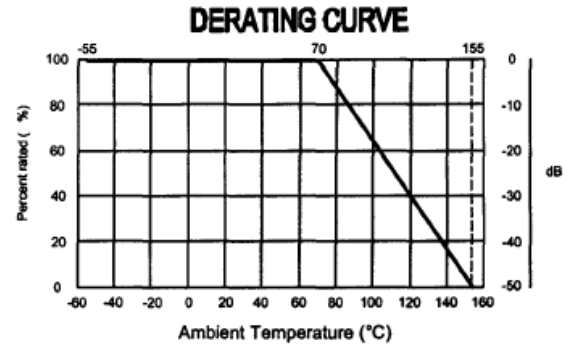
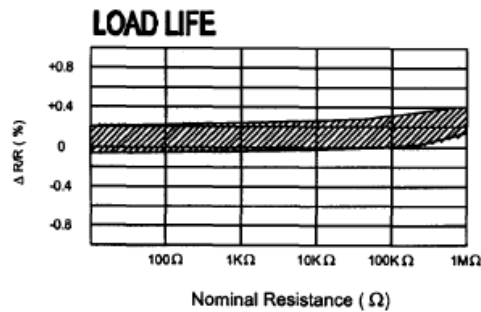
TCR = Temperature Coefficient Rating
RCWV = Rated Continuous Working Voltage

SIZE	DWG. NO.	ELECTRONIC FILE	REV
A	TA-143	TA-143.DWG	B
SCALE: NTS		U.O.M.: MILLIMETERS	SHEET: 2 OF 4

SPC-F004.DWG

ALL RIGHTS RESERVED. NO PORTION OF THIS PUBLICATION, WHETHER IN WHOLE OR IN PART CAN BE REPRODUCED WITHOUT THE EXPRESS WRITTEN CONSENT OF SPC TECHNOLOGY.

DWG. NO. SPC-F004 * EDITION 1.3/21/98 * DEP. No. 883



Multicomp Type No.	Resistance (ohms)
MFR1/2W-1%-10R	10
MFR1/2W-1%-11R	11
MFR1/2W-1%-12R	12
MFR1/2W-1%-13R	13
MFR1/2W-1%-15R	15
MFR1/2W-1%-16R	16
MFR1/2W-1%-18R	18
MFR1/2W-1%-20R	20
MFR1/2W-1%-22R	22
MFR1/2W-1%-24R	24
MFR1/2W-1%-27R	27
MFR1/2W-1%-30R	30
MFR1/2W-1%-33R	33
MFR1/2W-1%-36R	36
MFR1/2W-1%-39R	39
MFR1/2W-1%-43R	43
MFR1/2W-1%-47R	47
MFR1/2W-1%-51R	51
MFR1/2W-1%-56R	56
MFR1/2W-1%-62R	62
MFR1/2W-1%-68R	68
MFR1/2W-1%-75R	75
MFR1/2W-1%-82R	82
MFR1/2W-1%-91R	91
MFR1/2W-1%-100R	100
MFR1/2W-1%-110R	110
MFR1/2W-1%-120R	120
MFR1/2W-1%-130R	130
MFR1/2W-1%-150R	150
MFR1/2W-1%-160R	160
MFR1/2W-1%-180R	180

Multicomp Type No.	Resistance (ohms)
MFR1/2W-1%-200R	200
MFR1/2W-1%-220R	220
MFR1/2W-1%-240R	240
MFR1/2W-1%-270R	270
MFR1/2W-1%-300R	300
MFR1/2W-1%-330R	330
MFR1/2W-1%-360R	360
MFR1/2W-1%-390R	390
MFR1/2W-1%-430R	430
MFR1/2W-1%-470R	470
MFR1/2W-1%-510R	510
MFR1/2W-1%-560R	560
MFR1/2W-1%-620R	620
MFR1/2W-1%-680R	680
MFR1/2W-1%-750R	750
MFR1/2W-1%-820R	820
MFR1/2W-1%-910R	910
MFR1/2W-1%-1K	1K
MFR1/2W-1%-1K1	1.1K
MFR1/2W-1%-1K2	1.2K
MFR1/2W-1%-1K3	1.3K
MFR1/2W-1%-1K5	1.5K
MFR1/2W-1%-1K6	1.6K
MFR1/2W-1%-1K8	1.8K
MFR1/2W-1%-2K	2K
MFR1/2W-1%-2K2	2.2K
MFR1/2W-1%-2K4	2.4K
MFR1/2W-1%-2K7	2.7K
MFR1/2W-1%-3K	3K
MFR1/2W-1%-3K3	3.3K
MFR1/2W-1%-3K6	3.6K

SIZE	DWG. NO.	ELECTRONIC FILE	REV
A	TA-143	TA-143.DWG	B
SCALE: NTS		U.O.M.: MILLIMETERS	SHEET: 3 OF 4

SPC-F004.DWG

ALL RIGHTS RESERVED. NO PORTION OF THIS PUBLICATION, WHETHER IN WHOLE OR IN PART CAN BE REPRODUCED WITHOUT THE EXPRESS WRITTEN CONSENT OF SPC TECHNOLOGY.

DOC. NO. SPC-P004 • Effective 12/21/98 • DCP No. 680

Multicomp Type No.	Resistance (ohms)
MFR1/2W-1%-3K9	3.9K
MFR1/2W-1%-4K3	4.3K
MFR1/2W-1%-4K7	4.7K
MFR1/2W-1%-5K1	5.1K
MFR1/2W-1%-5K6	5.6K
MFR1/2W-1%-6K2	6.2K
MFR1/2W-1%-6K8	6.8K
MFR1/2W-1%-7K5	7.5K
MFR1/2W-1%-8K2	8.2K
MFR1/2W-1%-9K1	9.1K
MFR1/2W-1%-10K	10K
MFR1/2W-1%-11K	11K
MFR1/2W-1%-12K	12K
MFR1/2W-1%-13K	13K
MFR1/2W-1%-15K	15K
MFR1/2W-1%-16K	16K
MFR1/2W-1%-18K	18K
MFR1/2W-1%-20K	20K
MFR1/2W-1%-22K	22K
MFR1/2W-1%-24K	24K
MFR1/2W-1%-27K	27K
MFR1/2W-1%-30K	30K
MFR1/2W-1%-33K	33K
MFR1/2W-1%-36K	36K
MFR1/2W-1%-39K	39K
MFR1/2W-1%-43K	43K
MFR1/2W-1%-47K	47K
MFR1/2W-1%-51K	51K
MFR1/2W-1%-56K	56K
MFR1/2W-1%-62K	62K

Multicomp Type No.	Resistance (ohms)
MFR1/2W-1%-68K	68K
MFR1/2W-1%-75K	75K
MFR1/2W-1%-82K	82K
MFR1/2W-1%-91K	91K
MFR1/2W-1%-100K	100K
MFR1/2W-1%-110K	110K
MFR1/2W-1%-120K	120K
MFR1/2W-1%-130K	130K
MFR1/2W-1%-150K	150K
MFR1/2W-1%-160K	160K
MFR1/2W-1%-180K	180K
MFR1/2W-1%-200K	200K
MFR1/2W-1%-220K	220K
MFR1/2W-1%-240K	240K
MFR1/2W-1%-270K	270K
MFR1/2W-1%-300K	300K
MFR1/2W-1%-330K	330K
MFR1/2W-1%-360K	360K
MFR1/2W-1%-390K	390K
MFR1/2W-1%-430K	430K
MFR1/2W-1%-470K	470K
MFR1/2W-1%-510K	510K
MFR1/2W-1%-560K	560K
MFR1/2W-1%-620K	620K
MFR1/2W-1%-680K	680K
MFR1/2W-1%-750K	750K
MFR1/2W-1%-820K	820K
MFR1/2W-1%-910K	910K
MFR1/2W-1%-1M	1M

IPC-P004.DWG

SIZE	DWG. NO.	ELECTRONIC FILE	REV
A	TA-143	TA-143.DWG	B
SCALE: NTS		U.O.M.: MILLIMETERS	SHEET: 4 OF 4

LIITE 6: Jännitteenjakajan skaalauskerroimen mittaukset

Mittaukset tehtiin TKK:lla suurjännitelaboratorion huoneessa L308 lämpötilassa 21 °C.

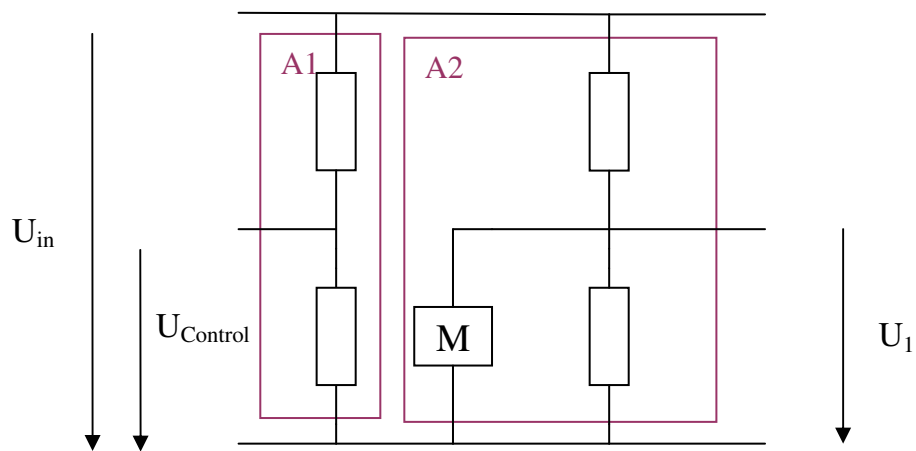
Skaalauskerroin S_f saadaan syöttäjännitteen U ja jakajan toisen komponentin yli olevan jännitteen U_1 suhteesta

$$S_f = \frac{U}{U_1} \quad (1)$$

Skaalauskerroimen suhteellinen ero referenssiskaalauskerroimeen $S_{f_{REF}}$ verrattuna lasketaan kaavalla

$$\frac{S_f - S_{f_{REF}}}{S_{f_{REF}}} * 100\% \quad (2)$$

Jännitteenjakajan skaalauskerroimen mittaukset tehtiin kuvan 1 mukaisella mittausjärjestelmällä. Syöttöjännite U_{in} mitattiin referenssijakajan avulla. Referenssijakajan skaalauskerroin on $S_f = 5030,06$. Suhteellisen eron referenssipisteinä käytettiin skaalauskerrointa jännitteellä 2 kV. Mittaustulokset on esitetty taulukossa 1.

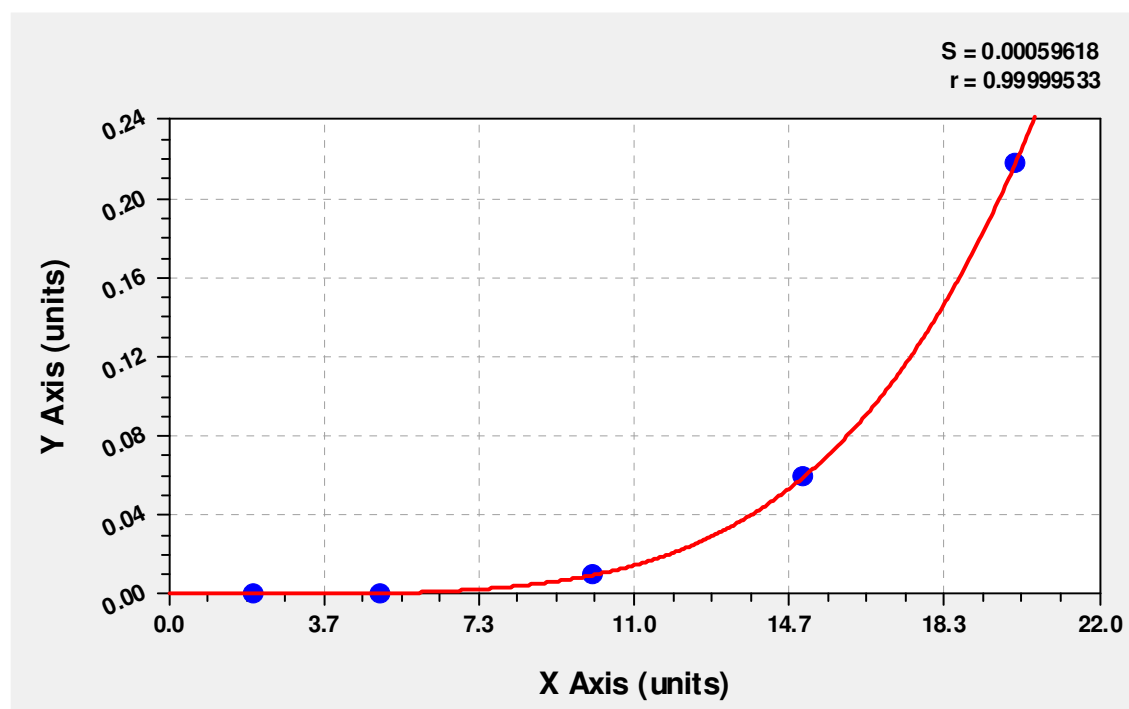


Kuva 1 Jännitteenjakajan skaalauskerroimen mittausjärjestelmä. A2 on mitattava jakaja ja mittari (M). A1 on referenssijakaja.

Taulukko 1 Skaalauskerroimen mittaustulokset, U = 1 - 20 kV

kV	U _{REF} (V)	U (V)	U ₁ (mV)	Sf	suht, ero (%)
1	0,1646	827,948	276,885	2990,22	0,04
2	0,2665	1340,511	448,469	2989,08	0,00
5	1,0649	5356,511	1791,970	2989,17	0,00
10	2,0002	10061,126	3365,390	2989,59	0,01
15	3,0321	15251,645	5099,200	2990,99	0,06
20	3,9167	19701,236	6576,430	2995,73	0,22

Tehtyjen mittausten perusteella saatuihin tuloksiin sovitettiin Curve Expert –ohjelman avulla neljännen asteen polynomikäyrä (kuva 2). Käyrän tiedot on esitetty kuvan alla.



Kuva 2 Neljännen asteen polynomikäyrä sovitettuna mittaustuloksiin

4th Degree Polynomial Fit: $y=a+bx+cx^2+dx^3...$

Coefficient Data:

a = 0.00014096817

b = -0.00060721688

c = 0.00022783813

d = -3.1734687e-005

e = 2.4670622e-006

4th Degree Polynomial Fit: $y=a+bx+cx^2+dx^3...$

Standard Error: 0.0005962

Correlation Coefficient: 0.9999953

Comments:

Linear regression completed successfully. No weighting used.

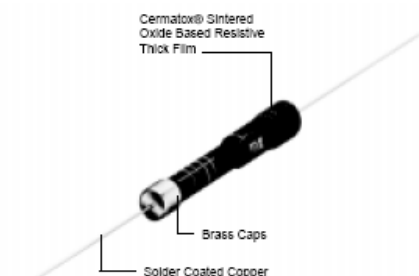
LIITE 7: Paksukalvovastus F44D:n tekniset tiedot

HIGH VOLTAGE THICK FILM RESISTOR



F SERIES

- Working voltage up to 28KV
- Wide resistance range
- Good resistance stability
- Termination variants
- Sets available with matched characteristics
- Good ratio matching over wide voltage range
- Series connection of resistors by screw terminals



SPECIFICATIONS:

IRC Type	Power Rating at 20°C (watts)	Resistance Range (ohms)	Limiting Element Voltage (volts)		TCR (ppm/°C) (values > 1G: TCR is 250ppm/°C)	Resistance Tolerance (%) (measured at 100 volts dc)	Values (any value to special order)	Thermal Impedance (°C/watt)	Operating Temperature Range (°C)
			In Air	In Oil					
F43	0.7	2M to 100G	4K	8K	-2000	2, 5, 10	EIA 2% values preferred	44	-55 to 100
F44	1.3	2M to 150G	14K	28K	-2000	2, 5, 10	EIA 2% values preferred	33	-55 to 100

CONSTRUCTION:

The Cermetox® sintered oxide based resistive thick film is fired onto the surface of a high quality ceramic onto which turned brass end caps are pressed. A helical cut is made into the film to adjust its ohmic value and finally a sleeve is fitted to provide mechanical protection and electrical insulation. Resistors for use in oil or SF₆ can be supplied with a lacquer protection instead of the sleeve.

TERMINATIONS:

Three styles of termination are available to permit resistors to be screwed together in a series chain, with the end members having axial wires for soldering.

Wire Terminations: Styles D and KU. See illustration.

Material: Solder-coated copper wire.

Screw Terminations: Styles TU and KU. See illustration.

Material: Turned brass

Screw Thread: All caps are tapped UNF-10 x 4.2 deep. UNF-10 is 32 TPI, 60° thread angle 4.72±0.07 mm outside diameter, 3.83 mm core diameter.

Coupling Stud: All KU & TU resistors are supplied with 8 mm long screwed brass studs.

MARKING:

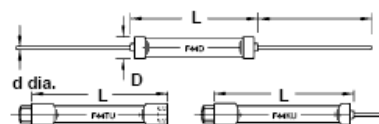
Type reference, resistance value, tolerance and data code are legend marked.

SOLVENT RESISTANCE:

The lacquer and protective sleeve provide excellent resistance to all normal industrial cleaning solvents suitable for printed circuits.

DIMENSIONS (Inches and (mm)):

Type	L max	D max	T min	d nom	PCB mounting centers	Min Bend Radius	Weight nom (g)
F43D	1.00 (25.4)	0.330 (8.4)	1.260 (32.0)	0.031 (0.8)	1.252 (31.8)	0.047 (1.2)	3.1
F44D	2.0 (50.8)	0.330 (8.4)	1.260 (32.0)	0.031 (0.8)	2.252 (57.2)	0.047 (1.2)	5.6
F43KU	1.19 (30.2)	0.335 (8.5)	1.260 (32.0)	0.031 (0.8)			3.9
F44KU	2.09 (53.2)	0.335 (8.5)					7.4
F43TU	1.28 (32.6)	0.335 (8.5)					5.8
F44TU	2.19 (55.6)	0.335 (8.5)					8.2



WIREWOUND AND FILM TECHNOLOGIES DIVISION

736 Greenway Road • Boone, North Carolina 28607-1860 • Tel: 828-264-8861 • Fax: 828-264-8866 • www.ircctt.com

**F SERIES PERFORMANCE DATA:**

	Load At Rated Power (1000 hrs at 20°C) ΔR%	Shelf Life (12 months at room temperature) ΔR%	Derating From Rated Power at 20°C	Noise (μV/V in decade of frequency)	Voltage Coefficient of Resistance (ppm/volt)
Typical	1	0.5	zero at 100°C	<2.5	<25

APPLICATION NOTES:

Due to the high voltage which can appear between the end cap and any adjacent metal part, resistors should be mounted at an adequate distance from other conductors.

Resistors may be screwed together as a stick to provide an assembly which will be capable of withstanding any desired voltage, providing no individual resistor is subjected to a greater stress or power dissipation than is recommended in this data sheet.

For some high voltage applications it is required to immerse the components in oil or gas to reduce the effects of corona and surface tracking. A special lacquer is available, suitable for immersion in transformer oil or SF₆. When resistors are required to be potted, the preferred encapsulant is a silicone compound.

For voltage dividers with a low resistance section below the minimum available value of an F43 resistor, it is entirely suitable to use an RC Series resistor, available down to 1 ohm.

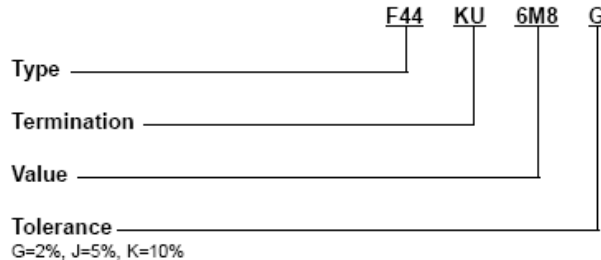
MATCHED SETS:

Matched sets can be supplied for use as voltage dividers. These may be screwed together to form sticks and, by selecting the KU type of termination, a wire connection can be provided at each end of the stick.

Inquiries are welcome for special resistors and sets when resistor length, operating voltage or resistance values is outside the catalog range.

HOW TO ORDER:

Specify type reference etc. as indicated in this example of type F44KU 6.8 ohms ±2% resistor.



Packaging: Bulk = 25 pieces per box

LIITE 8: Digitaalisen paneelimitin N15:n tekniset tiedot



DIGITAL PANEL METER N15 Type



1. APPLICATION

Digital panel meters of N15 series are destined for temperature, resistance, voltage from shunt, d.c. voltage and d.c. current measurement.

They have two versions of display field:

- 5 digits of 14 mm high,
- 4 digits of 20 mm high.

In red, green or blue colour.

N15 meters have an output to supply object transducers.

2. TECHNICAL DATA

INPUTS:

Resistance thermometer	Pt100, Pt500, Pt1000 acc. IEC 751 + A1 + A2
Potentiometer transmitter	4000 Ω
Thermocouples	J, K, N, E acc. EN 60584-1
Voltage measurement	-10...60 mV, 0...150 mV, 0...300 mV, 0...10 V, 0...200 V, ± 60 mV, ± 150 mV, ± 300 mV, ± 2 V, ± 10 V, ± 50 V, ± 200 V, input resistance > 1 M Ω
Current measurement	0...5 mA, 0...20 mA, 0...200 mA, 0...1 A, 0...5 A, ± 5 mA, ± 20 mA, ± 200 mA, ± 1 A, ± 5 A, for 1 A and 5 A input - resistance = 10 m Ω $\pm 10\%$ for other ranges, input - resistance $< 5 \Omega$

Current flowing through the resistance thermometer:

- Pt100 $< 800 \mu A$
- Pt500, Pt1000 $< 100 \mu A$

Resistance of wires linking the resistance thermometer with the meter $< 15 \Omega/\text{wire}$

Basic error 0.2% of range ± 1 digit

Additional errors in rated working conditions when measuring the temperature:

- compensation of reference junction temperature changes $\pm 0.2\%$ of the range
- compensation of wire resistance changes $\pm 0.2\%$ of the range
- from the ambient temperature changes $\pm (0.1\% \text{ of the range}/10 \text{ K})$

Averaging time min 0.2 s (significantly 1 s)

Output to supply object transducers 24 V d.c. $\pm 10\%$, max 25 mA

Rated operation conditions:

- supply voltage depending on the execution code
 - 230 V, 50/60 Hz $\pm 10\%$
 - 110 V, 50/60 Hz $\pm 10\%$
 - 24 V, 50/60 Hz $\pm 10\%$
 - 12 V d.c. $\pm 10\%$, without galvanic isolation
 - 24 V d.c. $\pm 10\%$
- ambient temperature -10...23...55°C
- storage temperature -25...85°C
- relative humidity $< 95\%$ (no condensation)
- working position any

Sustained overload:

- thermocouples, resistance thermometers, resistance measurement of voltage and current 1%
- measurement of voltage and current 10%

Short-duration overload (3 s):

- inputs of sensors and voltage up to 60 mV 30 V
- voltage input > 60 mV 10 Un (< 1000 V)
- current input 10 In

Display field

- (depending on execution) four LED displays (digit height = 20 mm) red or green colour; indication range: -1999...9999 or five LED displays (digit height = 14 mm) red, green or blue colour; indication range: -19999...19999

Ensured protection level

IP 50 or IP 65 (from frontal side)

Overall dimensions

96 \times 48 \times 64 mm (with terminals)

Cut-out dimensions

92 $^{+0.5}_{-0.5}$ \times 45 $^{+0.5}_{-0.5}$ mm

Weight

< 250 g

Power consumption

< 6 VA

Preheating time

15 minutes

Resistance against voltage decay

EN 61000-6-2

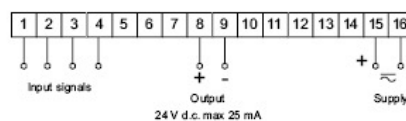
Electromagnetic compatibility:

- immunity EN 61000-6-2
- emission EN 61000-6-4

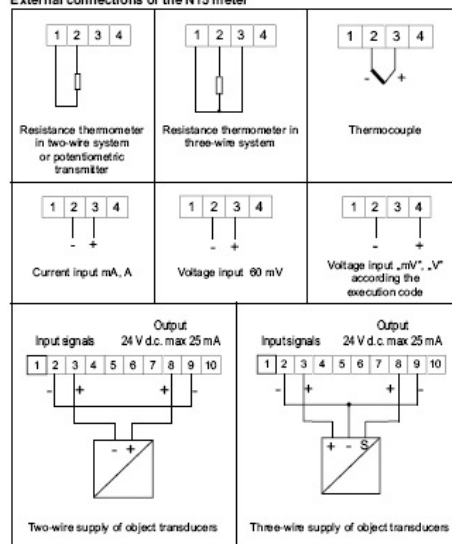
Safety requirements acc. EN 61010-1 standard:

- installation category III
- pollution degree 2
- phase-to-earth working voltage 300 V a.c.

3. EXTERNAL CONNECTION DIAGRAMS



External connections of the N15 meter



5. ORDERING CODES

Table 1

N15 DIGITAL METER	XX	X	X	X	X	X	X	XX	X	XX	...
Input:											
Pt100 (-200...850°C)	00										
Pt100 (-50...150°C)	01										
Pt100 (-50...250°C)	02										
Pt100 (-50...400°C)	03										
Pt100 (-50...600°C)	04										
Pt500 (-200...850°C)	05										
Pt1000 (-200...850°C)	06										
Potentiometer, transmitter 4000 Ω	07										
Thermocouples J, K, N, E, - 10...60 mV	08										
0...150 mV	09										
0...300 mV	10										
0...10 V	11										
0...200 V	12										
±60 mV	13										
±150 mV	14										
±300 mV	15										
±2 V	16										
±10 V	17										
±50 V	18										
±200 V	19										
0...5 mA	20										
0...20 mA	21										
0...200 mA	22										
0...1 A	23										
0...5 A	24										
±5 mA	25										
±20 mA	26										
±200 mA	27										
±1 A	28										
±5 A	29										
on order*	XX										
Number of displays:											
4 digits of 20 mm high	4										
5 digits of 14 mm high	5										
Display colour:											
red	R										
green	G										
blue**	B										
on order*	X										
Supply voltage:											
230 V 50/60 Hz	1										
110 V 50/60 Hz	2										
24 V 50/60 Hz	3										
24 V d.c.	4										
12 V d.c. without galvanic isolation	5										
on order*	X										
Supplying output:											
without output	0										
24 V d.c. (maximal load 25 mA)	1										
Protection level through the housing:											
IP 50	0										
IP 65	1										
Kind of terminals:											
socket - screw plug	0										
on order***	1										
Version:											
standard	00										
custom made*	XX										
Acceptance tests:											
without an extra quality inspection certificate	0										
with an extra quality inspection certificate	1										
according customer's agreement*	X										
Unit:											
(only in the execution with 5 digits). The code number according table 2	XX										

NOTE! When ordering give:

- measuring range,
- sensor type (concerning the input to co-operate with a thermocouple, e.g. J),
- choice of compensation (concerns temperature meters):
manual (give the value °C, Ω), automatic

- * The code number must be agreed with the manufacturer
- ** The blue colour is only possible in the version with 5 digits
- *** Possible version with self-locking sockets.

Code of the highlighted unit

Table 2

Code	Unit	Code	Unit
00	V	24	ms
01	A	25	s
02	mV	26	h
03	kV	27	N
04	MV	28	kN
05	mA	29	Pa
06	kA	30	hPa
07	MA	31	kPa
08	°C	32	MPa
09	°F	33	bar
10	K	34	rad
11	Hz	35	Ω
12	kHz	36	kΩ
13	Ah	37	%
14	kAh	38	°
15	m/s	39	turns
16	μm	40	rps
17	mm	41	rpm
18	cm	42	rph
19	m	43	m/h
20	km	44	km/h
21	l	45	imp
22	l/s	XX	on order *
23	l/h		

* - After agreeing with the manufacturer

Examples of order:

When ordering, one must respect successive code numbers.

Code: N15 08 5 G 1 0 1 0 00 0 08 0...450°C, J, comp. auto means:

- N15 - N15 digital meter
- 08 - thermocouple J input
- 5 - 5 LED digit displays (digit height = 14 mm)
- G - green colour displays
- 1 - supply: 230 V 50/60 Hz
- 0 - without output to supply object transducers
- 1 - protection degree from frontal side: IP 65
- 0 - socket - screw-plug terminals
- 00 - standard version
- 0 - without an extra quality inspection certificate
- 08 - unit: °C

Programmed measuring range: thermocouple J = 0...450°C
Automatic compensation of cold junction temperature changes, programmed by the manufacturer.

Code: N15 01 4 R 1 1 0 0 00 0 08 0...100°C, comp. auto means:

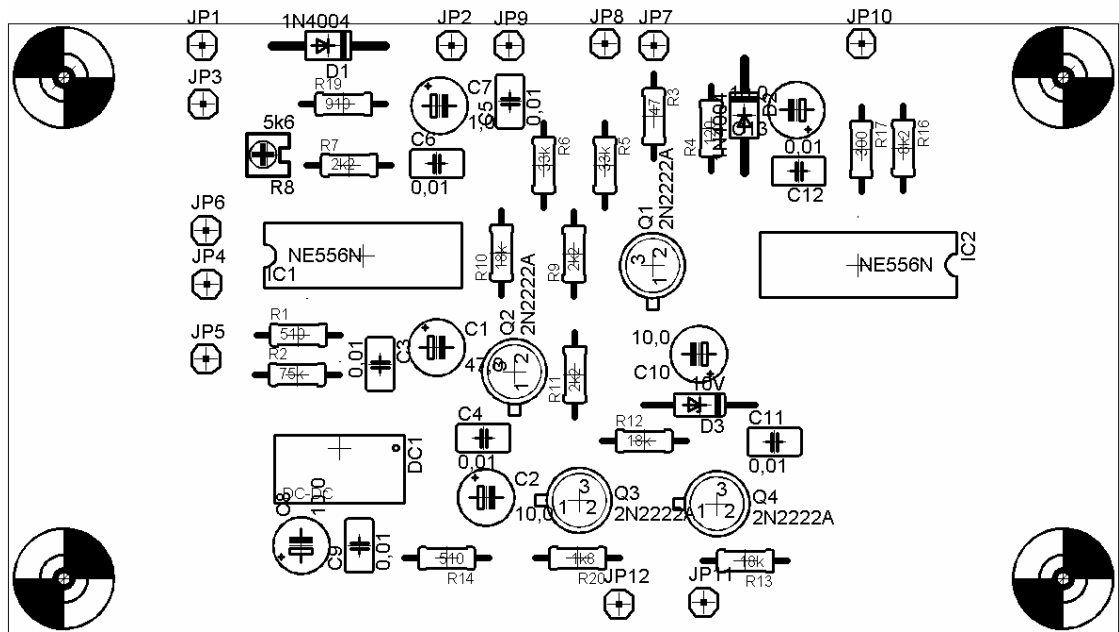
- N15 - N15 digital meter
- 01 - Pt100 resistance thermometer input (-50...150°C)
- 4 - four LED digit display (digit height = 20 mm)
- R - red colour displays
- 1 - supply: 230 V 50/60 Hz
- 1 - output to supply object transducers: 24 V d.c. (maximal load = 25 mA), for supplying object transducers
- 0 - protection level through the housing: IP 50
- 0 - socket - screw-plug terminals
- 00 - standard version
- 0 - without an extra quality inspection certificate
- 08 - unit: °C
- 0...100 - programmed indication range: 0...100°C

Automatic compensation of wire resistance, programmed by the manufacturer.

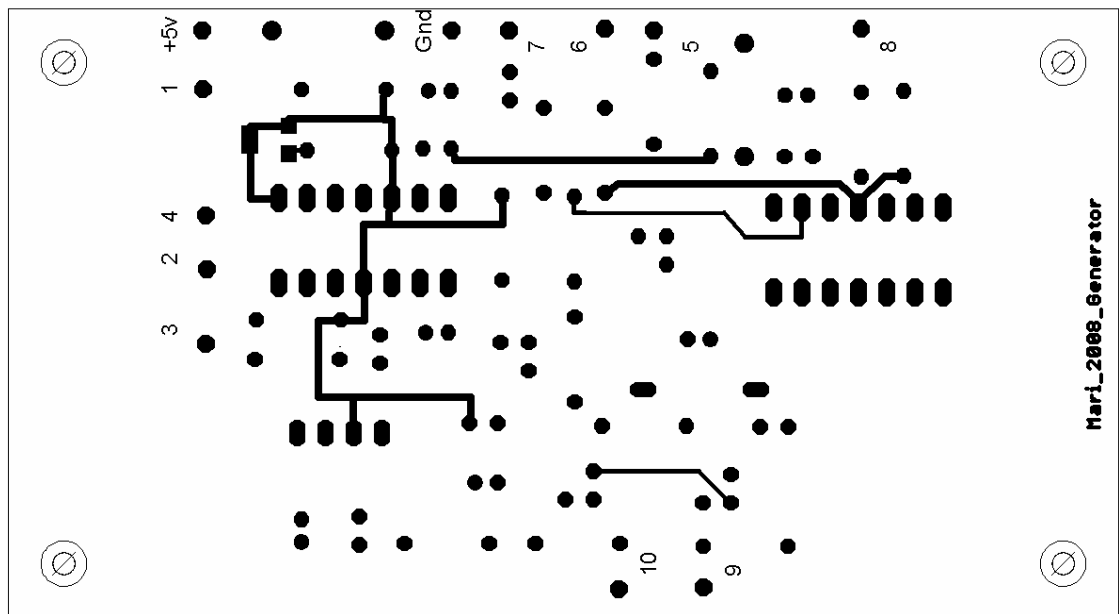
If ordered, a programmer of PD15 type enabling the modification of N15 digital meter parameters can be delivered with the software on a diskette.

- PD15 main features:
- programming of individual characteristics,
 - setting of the decimal point,
 - setting of the averaging time,
 - selection of the sensor compensation mode,
 - unit highlighting,
 - meter re-calibration.

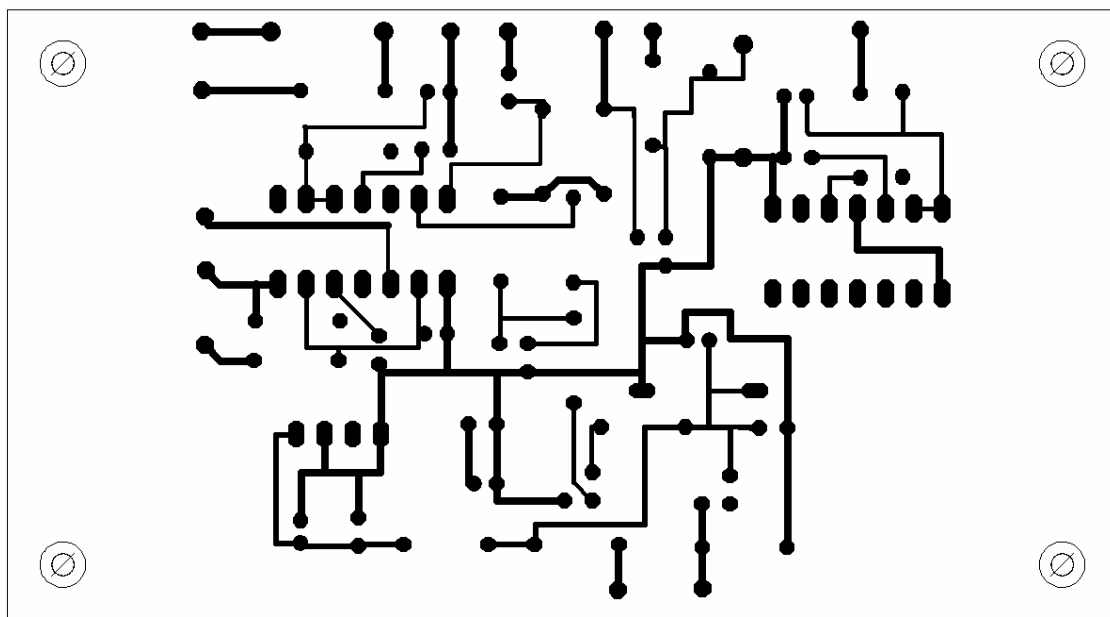
LIITE 9: Ohjauspiiri



Kuva 47 Ohjauspiirin komponentit



Kuva 48 Ohjauspiirin piirilevy yläpuolelta



Kuva 49 Ohjauspiirin piirilevy alapuolelta